

陳腐化を考慮した大規模情報システムの 最適更新戦略

山本浩司¹・貝戸清之²・青木一也³・小林潔司⁴・菱田憲輔⁵

¹正会員 中日本高速道路株式会社 東京支社 清水工事事務所 (〒424-0114 静岡市清水区庵原町219-11)
E-mail:k.yamamoto.af@c-nexco.co.jp

²正会員 大阪大学特任講師 大学院工学研究科グローバル若手研究者フロンティア研究拠点 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)
E-mail:kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp

³正会員 株式会社パスコ 研究開発センター (〒153-0043 目黒区東山2-8-11 目黒ビル新別館1F)
E-mail:kiakzo6013@pasco.co.jp

⁴フェロー会員 京都大学教授 経営管理大学院経営管理講座 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)
E-mail:kkoba@psa.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

⁵正会員 株式会社JALナビア (〒140-8605 品川区東品川2-4-11 8F)

大規模情報システムの更新戦略を検討する場合、ニーズの変化や技術革新の結果として生じるシステムの陳腐化を考慮することが必要となる。本研究では、基幹システムと複数のサブシステムで構成される大規模情報システムを考える。さらに、システムの陳腐化過程には不確実性が介在する。このようなシステム環境では、1) 更新時点を遅らせることにより発生する情報オプションと、2) 将来の拡張可能性を担保することによる拡張オプションが存在する。本研究では、期待純便益を最大にするように、システムの更新時点とサブシステムの集約化戦略を決定するような最適システム更新モデルを提案し、システム更新のリアルオプション価値を計測する。さらに、交通管制情報システムの更新問題を対象として、本モデルの有効性を実証的に検証する。

Key Words : *systems obsolescence, real option, optimal replacement, information systems*

1. はじめに

土木施設を運営・管理するためには、大規模情報システムによる支援が不可欠である。施設利用者は、情報システムが提供するサービスから多くの便益を享受している。情報システムの機能が陳腐化すれば、利用者に機会損失が発生することになる。情報システムの陳腐化が発生する理由としては、様々な要因が考えられる。例えば、土木施設に対する需要の変化が生じた場合には、既存の情報システムでは機能的に十分に対応できなくなるという社会・経済的陳腐化が発生する。また、技術革新の結果によりシステムの技術的水準自体が陳腐化する場合がある¹⁾。

本研究では、大規模情報システムの社会・経済的、技術的陳腐化を考慮した最適更新問題を取りあげる。情報システムの技術革新が発生すれば、大規模情報システムの社会・経済的陳腐化が発生する。まず、情報技術の技術革新により、情報システムの導入費用が低下するため、より安価に高性能の情報システムを導入できる。このため、既往のシステムを集約化し、規模の経済性を追及することが可能となる。また、新しい技術を活用することにより、今までにない新しいサービス機能を施設利用者に提供することが可能となる。その

結果、時間の経過に伴って既存システムの技術的水準とその時点の技術水準の下で実現可能な最適なシステム水準との乖離が生じる。このように現有のシステムと最適なシステムとの間の乖離の程度が増大していく現象をシステムの陳腐化と呼ぶ。

大規模情報システムの陳腐化が進展すれば、システムの更新を検討することが必要となる。しかし、システムの更新には膨大な費用が発生し、一度システムが導入されれば技術の変更は容易ではない。大規模システムの投資には、このようなシステムの不可分性、固定費用の存在、不可逆性が存在する。さらに、将来時点における大規模情報システムに対する施設利用者のニーズや新しい技術の導入可能性に関する不確実性が介在する。このような更新環境では、1) 更新時点を遅らせることにより発生する情報オプションと、2) 将来の拡張可能性を考慮することにより生じる拡張オプションが存在する。システムの更新戦略を考える場合、このようなオプション価値を明示的に考慮し、期待純便益を最大にする更新時点と、システムに導入すべきサブシステムのメニューを決定することが重要となる。

以上の問題意識の下に、本研究では大規模情報システムの社会・経済的、技術的な陳腐化を考慮した最適シ

システム更新モデルを定式化する。さらに、交通管制情報システムの更新問題を対象として、システムの集約化と新しいサブシステムの導入戦略を検討するための方法論を提案する。以下、2. では本研究の基本的な考え方を示す。3. では最適システム更新モデルを定式化し、4. でモデルの解法を示す。5. で適用事例を示す。

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 従来の研究概要

高度情報技術等では、技術革新の進展の結果、既存情報システムに技術的陳腐化が発生することが多くの文献において指摘されている。しかし、技術的陳腐化に関する科学的・学術的なアプローチについては、ほとんど蓄積がないのが実情である。しかし、技術的陳腐化の原因となる技術革新に関しては、膨大な蓄積がある。1960年代、新古典派経済成長理論²⁾やビンテージ理論³⁾に基づいて、企業の生産性に関する長期的変化や生産性の異質性に関する実証的研究が蓄積された。

最近では、1990年代の情報技術の革新や、日本企業における生産資本の技術的陳腐化に対する懸念から、生産技術を対象とした技術進歩に関する実証的研究が再び注目されている¹⁾。多くの技術進歩は、新しい種類の資本・設備の中に体化される^{2),3)}。言い換えれば、技術革新の効果は、企業が新しい資本設備を導入することにより、生産性の向上として発現される。このような観点から、資本ストックの計測に際して、資本の物理的減耗や除却だけでなく、資本の技術的陳腐化を考慮した経済的減耗率を計測しようとする試みが見られる⁴⁾。第1に、資本財の中古価格の差異⁵⁾に着目し、資本財の2つの価格指数の差を用いて資本に体化された技術進歩を計測する方法⁶⁾、価格指数の差から資本財の質の向上の大きさを計測する方法⁷⁾が提案されている。第2の方法は生産関数の推定に基づいて資本に体化する技術進歩を求めるものである^{8),9)}。これらの既往の研究では、技術進歩は、1) 資本の質の向上、2) 価格の低下という2つの側面で把握でき、これらの可能性が生じた場合、技術的陳腐化が発生する。さらに、近年発展を遂げた内生的経済成長論¹⁰⁾⁻¹²⁾においては、技術革新によって新しいメニューが増加することによる規模の経済性の重要性が指摘されている。新技術が開発され、それが既存技術と並行して導入可能になることにより、生産性が持続的に増加する。このように、3) 新技術の導入可能メニューの増加によっても、既存技術の技術的陳腐化が発生する。

情報システムの陳腐化は、それを利用する施設利用者のニーズや需要の変動によっても生じる。本研究の実証分析でとりあげる交通管制情報システムの場合、新

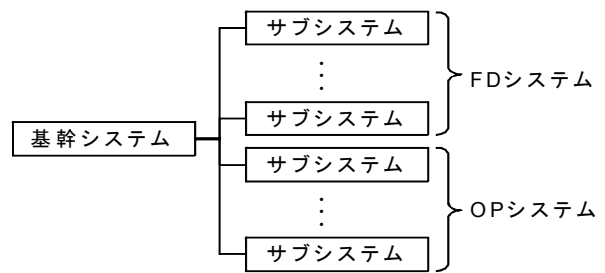


図-1 情報システムの構成

しい路線が開通することにより、既存システムに対する負荷が急増し、その処理能力では対応しきれない状況が発生する。この場合、交通管制情報システムの更新が必要となる。あるいは、施設利用者のニーズが高度化し、既存のシステムでは対応できないような新しい交通情報サービスの提供が求められることもある。このような状況下において、交通管制情報システムの既存技術を継続的に利用し続ける場合、情報システムが更新により本来獲得できるであろう便益を逸失する(機会費用が発生する)ことになる。本研究では、最適な技術を利用しないことによって機会費用が発生し、さらに機会費用が増加する現象をシステム陳腐化と呼ぶこととする。

従来より、需要の不確実な変化に対応して、供給容量を効率的に対応させる段階的供給戦略に関する研究が進展している。特に、不確実性下における投資戦略に関しては、リアルオプション理論の分野で膨大な研究¹³⁾⁻¹⁶⁾の蓄積がある。しかし、これらの研究は、需要の不確実性に対応した容量の拡張オプションや情報オプションの計量化を試みたものであり、本研究で着目するような情報システムの集約化を議論するものではない。また、筆者らの知る限り、情報システムの技術的陳腐化を考慮して、情報システムの更新・集約戦略を分析した事例は本研究以外には見当たらない。

(2) 情報システムの更新・集約化問題

本研究で対象とする交通管制情報システムは、図-1に示すように、基幹システムと複数のサブシステムで構成されている。基幹システムは、データ処理、管理を担う中央局コンピュータであり、大規模情報システム全体を統括する中枢的システムである。一方、サブシステムは、特定の目的に特化された管理業務を執行するためのシステムである。IT技術の進歩により、交通管制情報システムの高度化が可能である。第1に、基幹システムの処理能力の向上とともに、それまで独立に機能してきたサブシステムを、基幹システム上に集

約することが可能となる。情報システムの集約化により、1) 情報の蓄積、情報の流れを一元化でき、情報処理の効率化を図ることが可能となる。また、2) 情報システムの集約化により、故障に対する対応能力も向上する。第2に、システムの冗長化やバックアップ機能の整備等を通じて、大規模情報システムの信頼性を向上させることが可能である。このような冗長化やバックアップにより、情報システムの集約化によって発生する社会的・経済的損失リスクの拡大を抑止できる可能性がある。当然のことながら、大規模情報システムの集約化の程度は、基幹システムの情報処理能力に依存する。山本らは、すでに中日本高速道路株式会社横浜支社が管理する中央局システムの動的故障解析を行い、現在分散している交通管制情報システムを集約化することにより、期待ライフサイクル費用、および期待影響度の最小化を同時に達成できることを明らかにしている¹⁷⁾。したがって、本研究では、サブシステムにおける情報処理を基幹システムで一括して統括・管理するような、大規模情報システムの集約化政策の導入問題を考えることとする。

いま、システム管理者が基幹システムの最適な更新タイミングとサブシステムを集約する戦略を同時に決定する問題を考える。基幹システムの更新時に、サブシステムの更新も同時に実施され、システム全体の高度化が達成される。交通管制情報システムの陳腐化の問題を考慮する場合、従前にはなかった新しいサブシステムを大規模情報システムに導入することを検討することが必要となる。この場合、大規模情報システムの更新時にシステムに導入されるサブシステムもあれば、更新時点では導入されず技術が成熟した段階で導入されるものも存在する。さらに、情報システムには技術革新が発生する可能性がある。技術革新が起これば、同一処理能力を持つ情報システムの導入費用が低減する。基幹システムのCPU能力は、更新時点において決定され、一度更新を実施すると、途中の容量増加は不可能である。将来時点においてサブシステムを追加するためには、基幹システムの更新時点において、それを支援するためのCPU能力が確保されていなければならない。言い換えれば、システム更新時には、将来におけるサブシステムの追加導入の可能性を考慮することが必要である。いま、図-2に示すように、大規模情報システムに導入されるサブシステムを、1) 既存システムにおいて用いられているが、システム更新時に大規模情報システムに集約されるサブシステム (Fixed System; 以下、FDシステム) と、2) 既存システムでは導入されていないが、基幹システムが更新されたのちに、大規模情報システムに導入されることが予定されているシステム (Optional System; 以下、OPシステ

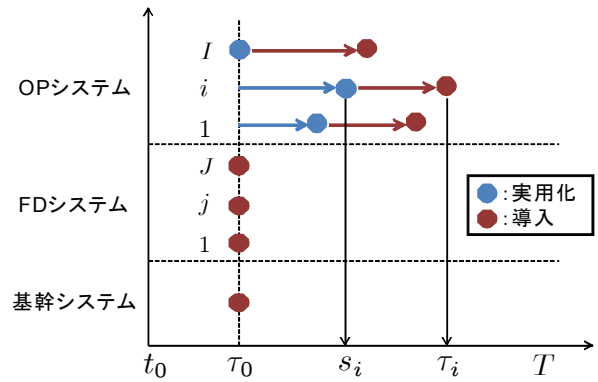


図-2 離散的な時間軸

ム) に分類する。

大規模情報システムの便益は、各サブシステムがもたらす便益の総和で表され、これらの便益は時間を通じて一定であると仮定する。一方、基幹システムは、それ自体としては便益をもたらさないが、基幹システムが存在しないとサブシステムは便益を発生しない。基幹システムのCPU能力は、導入可能なサブシステム数に影響を及ぼす。言い換えれば、基幹システムのCPU能力向上の価値は、導入可能なサブシステム数を増加させるというメニュー効果として現れる。システム管理者は、システムの更新によりもたらされる純便益を最大にするような基幹システムとサブシステムの更新・投資戦略を求めると。その場合、システム管理の戦略は、システムの更新タイミングと処理能力、およびOPシステムのメニューとそれぞれの投資タイミングである。

3. 最適システム更新モデル

(1) 前提条件

カレンダー時刻 t_0 を始点とする離散時間軸を考える (図-2 参照)。初期時点 $t = 0$ とし、目標年次 $t = T$ までの離散時間軸 $t = 0, 1, \dots, T$ を対象とする。離散時間軸上の点を時点と呼び、カレンダー時刻と区別する。離散時間軸上で、システムの更新タイミングを τ_0 と表記する。FDシステムの更新も、時点 τ_0 に実施される。OPシステム i が実用化される時点 s_i (図中の青丸)、導入される時点 τ_i (図中の赤丸) と表す。ここで、実用化とはOPシステムの開発が終了し、基幹システムへの搭載が可能であることを意味し、導入とはOPシステムを実際に基幹システムへ搭載することを意味している。OPシステムによっては実用化されているものの、導入費用などの問題によって導入までに時間を要する技術もある。この実用化から導入までの期間を図中の赤い矢印で表現し、導入可能期間と呼ぶ。また、情報システムが更新される時点 τ_0 において、OPシステム i がすでに実用化さ

れている場合もある。すなわち、 $s_i < \tau_0$ が成立する場合もある。しかし、基幹システムが更新されない限り、OPシステムの導入は不可能であり、 $\tau_i \geq \tau_0$ ($i = 1, \dots, I$)が必ず成立する。

システム管理者は、1) システムの最適更新タイミング τ_0^* と、交通管制情報システムに τ_0^* 以降に導入すべきと判断されたOPシステムの最適メニュー $\boldsymbol{u}^*(\tau_0^*)$ 、2) OPシステムの最適導入タイミング τ_i^* ($i \in \mathcal{H}(\boldsymbol{u}^*(\tau_0^*))$)を決定する。ただし、OPシステムメニュー $\boldsymbol{u}(\tau_0^*)$ は、以下のように表現できる。

$$\boldsymbol{u}(\tau_0^*) = (u_1(\tau_0^*), \dots, u_I(\tau_0^*)) \quad (1)$$

$$u_i(\tau_0^*) = \begin{cases} 1 & \text{OPシステム}i\text{を}\tau_0^*\text{以降の} \\ & \text{最適なタイミングで導入するとき} \\ 0 & \text{そうでないとき} \end{cases}$$

ただし、更新時点 τ_0 が異なれば、OPシステムの導入費用が異なるため、ダミー変数 $u_i(\tau_0)$ はシステムの更新時点 τ_0 の関数となっている。また、集合 $\mathcal{H}(\boldsymbol{u}(\tau_0^*))$ は、最適更新タイミング τ_0^* で更新される交通管制情報システムに導入すべきであると判断されたOPシステムの集合を表し、

$$\mathcal{H}(\boldsymbol{u}(\tau_0^*)) = \{i | u_i(\tau_0^*) = 1 \ (i = 1, \dots, I)\} \quad (2)$$

と定義できる。当然ながら、交通管制情報システムの τ_0^* 時点における更新費用には、OPシステム集合 $\mathcal{H}(\boldsymbol{u}(\tau_0^*))$ を将来時点で導入するための拡張費用も考慮している。FDシステムに関しては、初期時点において、「システムの更新時にシステムに導入する」ことが確定しているサブシステムである。初期時点において、サブシステムの中で、FDシステムとOPシステムの区別が確定していると考えられる。サブシステムの中には、導入が決定され、かつ実用化もされているが、現時点における導入費用が高いため、導入を見送っている技術も存在する。このようなサブシステムは、OPシステムのカテゴリーに含める。

基幹システムの導入費用は、時間の経過に伴って減少する。さらに、導入されるOPシステムのメニュー $\boldsymbol{u}(\tau_0)$ に依存する。基幹システムの導入費用を $C_0(\tau_0, \boldsymbol{u}(\tau_0))$ と表す。OPシステム、FDシステムの導入費用も、時間が経過することにより、費用が減少すると仮定する。OPシステムは、開発途上の要素技術が実用化されなければ導入可能でないが、要素技術を支える情報処理システムが汎用的情報技術で構成されており、基幹システム、FDシステムと同様に、時間の経過により導入費用が低減することになる。このとき、一般的にOPシステムの実用化時点、導入費用および導入費用の低減は不確定である。しかし、本研究で対象とする交通管制情報システムに限定すれば、OPシステムの技術開発は終了しており、カスタマイズやバグ修正を残すのみである。

OPシステムの導入費用は概算的に把握しており、その低減に関しても中日本高速道路株式会社における同様のシステムに対する過去の実績に基づき算出することが可能である。したがって、本研究ではこれ以降、OPシステムの実用化時点のみが不確定であると考えられる。さらに、これらの導入費用関数は確定的であり、基幹システム、OPシステム、FDシステムの導入費用関数を

$$C_0(\tau_0, \boldsymbol{u}(\tau_0)) = C_0(\boldsymbol{u}(\tau_0)) \exp(-\zeta_0 \tau_0) \quad (3a)$$

$$C_i(\tau_i) = C_i \exp(-\zeta_i \tau_i) \quad (3b)$$

$$C_j(\tau_0) = C_j \exp(-\tilde{\zeta}_j \tau_0) \quad (3c)$$

と表す。ただし、 ζ_0, ζ_i ($i = 1, \dots, I$), $\tilde{\zeta}_j$ ($j = 1, \dots, J$)は、技術革新による瞬間的価格低減率を表す。OPシステムの導入費用関数 $C_i(\tau_i)$ は、 $s_i \leq \tau_i$ の領域で定義されるが、時点 s_i に関しては不確実性が存在する。サブシステムは基幹システムに接続されない限り便益を発生しない。大規模情報システムは、各サブシステムがもたらす便益の総和で表されると考える。OPシステム i ($i = 1, \dots, I$)が時点 t でもたらす便益を e_i^t 、FDシステム j ($j = 1, \dots, J$)の便益を f_j^t と表す。

以下では、議論の見通しをよくするため、既存情報システムが存在せず、新たに情報システムを導入する場合をとりあげる。以下、**3. (2)**でOPシステムの最適導入戦略を、**3. (3)**でOPシステムのメニュー価値を定式化する。**3. (4)**で、システムの最適導入戦略を定式化する。その上で、**3. (5)**において、システム管理者がすでに情報システムを保有しており、新しいシステムに更新する戦略を検討する最適システム更新モデルに拡張する。

(2) OPシステムの最適導入戦略

システムを時点 τ_0 に導入する場合を考える。導入時点 τ_0 を始点とする離散軸上で、どの時点でOPシステムを基幹システムに接続すべきかという問題を考える。導入時点 τ_0 において、FDシステムはすでに基幹システムに導入されている。その一方で、基幹システムおよびFDシステムの導入時点 τ_0 において、すべてのOPシステムが実用化されているわけではない。あるいは、OPシステムの中には、すでに実用化されているものの、導入費用が高額であり、導入を先送りしているような技術もある。このようなOPシステムの状態を記述するために、OP技術の導入可能性を表す状態変数ベクトル $\boldsymbol{\gamma}(t) \in \Xi$ を

$$\boldsymbol{\gamma}(t) = (\gamma_1(t), \dots, \gamma_I(t)) \quad (4)$$

$$\gamma_i(t) = \begin{cases} 1 & \text{時点}t\text{で導入可能なとき} \\ 0 & \text{導入不可能なとき} \end{cases}$$

と定義する。 Ξ は、導入可能ベクトルの集合である。さらに、以下の集合を定義する。

$$\begin{cases} \mathcal{F}(t) & \text{時点 } t \text{ において実用化されている OP} \\ & \text{システムの集合} \\ \mathcal{F}^c(t) & \text{実用化されていない OP システムの集合} \end{cases} \quad (5)$$

ここで、OPシステム*i*が時点 s_i に導入可能になったと考える。OPシステムの導入費用に不確実性が存在しないという仮定より、時点 s_i でOPシステムの最適導入時点を一意的に決定できる。時点 s_i 以降の時点 τ_i ($\tau_i \geq s_i$)において、OPシステムを導入した場合に獲得できる純便益の時点 t ($\tau_i \geq t \geq s_i$)の当該期価値 $W_i(\tau_i, t)$ は

$$W_i(\tau_i, t) = \sum_{r=\tau_i}^T \eta^{(r-t)} (e_i^r - b_i^r) - \eta^{(\tau_i-t)} C_i(\tau_i) \quad (6)$$

と表される。ただし、 $\eta^{(r-t)}$ は、時点 r の価値を時点 t に割り戻すための割引因子であり、瞬間的割引率 ρ を用いて $\eta^{(r-t)} = \exp\{-\rho(r-t)\}$ と定義される。また、 b_i^r は、OPシステムの維持補修費用である。したがって、OPシステムの最適導入タイミング $\tau_i^*(s_i)$ は

$$\tau_i^*(s_i) = \arg \max_{\tau_i \geq s_i} \{W_i(\tau_i, s_i)\} \quad (7)$$

と表される。ここに、記号 \arg は、最大値を与える変数を指示する記号である。仮定より、OPシステムは基幹システムと接続されることにより、初めて効果を発揮することができる。いま、システム導入時点 τ_0 において、すでにOPシステムが実現化されていると考える。この時、OPシステムを最適タイミングに導入することにより獲得可能な導入時点 τ_0 における当該期割引純便益の最大値は

$$W_i^*(\tau_0) = \begin{cases} W_i(\tau_i^*(s_i), \tau_0) & \tau_i^*(s_i) \geq \tau_0 \text{ の時} \\ W_i(\tau_0, \tau_0) & \tau_i^*(s_i) < \tau_0 \text{ の時} \end{cases} \quad (8)$$

と表される。ただし、

$$W_i(\tau_i^*(s_i), \tau_0) = \sum_{t=\tau_i^*(s_i)}^T \eta^{(t-\tau_0)} (e_i^t - b_i^t) - \eta^{(\tau_i^*(s_i)-\tau_0)} C_i(\tau_i^*(s_i)) \quad (9a)$$

$$W_i(\tau_0, \tau_0) = \sum_{t=\tau_0}^T \eta^{t-\tau_0} (e_i^t - b_i^t) - C_i(\tau_0) \quad (9b)$$

である。

(3) OPシステムのメニュー価値

システムの導入時点 τ_0 においては、OPシステムが実用化される時点は不確実である。このため、OPシステムの導入戦略を検討するためには、OPシステムが実現される過程をモデル化することが必要となる。いま、説明の都合上、一時的に、初期時点 τ_0 を起点とする連続時間軸を考え、各OPシステムが実用可能となる事象が、

連続時間軸上でランダムに到着すると仮定する。OPシステム*i* ($i = 1, \dots, I$)が初期時刻から導入可能となるまでの経過時間(実現時間と呼ぶ)を確率変数 ζ_i で表す。OPシステム*i*の実現時間が、確率密度関数 $h_i(\zeta_i)$ 、分布関数 $F_i(\zeta_i)$ に従うと仮定する。確率密度をハザード関数^{18),19)} $\lambda_i(y_i)$ を用いて表現する。この時、ハザード関数は、時刻 y_i まで実現していない確率 $\tilde{F}_i(y_i)$ を用いて、

$$\lambda_i(y_i) \Delta y_i = \frac{h_i(y_i) \Delta y_i}{\tilde{F}_i(y_i)} \quad (10)$$

と表せる。すなわち、指数ハザード関数 $\lambda_i(y_i)$ は、初期時刻から時間 y_i が経過するまで、OPシステムが実用化されないという条件の下で、期間 $[y_i, y_i + \Delta y_i]$ 中に実用化される条件付確率である。ハザード関数がサンプル時間軸上の時刻 y_i に依存せず、常に一定値 $\zeta_i > 0$ をとる場合、指数ハザード関数

$$\lambda_i(y_i) = \zeta_i \quad (11)$$

が成立する。指数ハザード関数を用いれば、OPシステムの実現時期が y_i 以上となる確率 $\tilde{F}_i(y_i)$ は、

$$\tilde{F}_i(y_i) = \exp(-\zeta_i y_i) \quad (12)$$

と表現できる。

ここで、再びカレンダー時刻 t_0 を起点とする離散時間軸上の時点 $t = 0, 1, 2, \dots$ を考える。2つの連続する時点間の間隔を1年間と考える。指数ハザード率 ζ_i も、1年間の基本単位とするように定義されていると考える。時点 t にシステムが実用化されておらず、かつ時刻 $t+1$ においても、実用化されていない確率は

$$\begin{aligned} \tilde{\pi}_i^{t,t+1} &= \text{Prob}\{\zeta_i \geq t+1 | \zeta_i \geq t\} \\ &= \frac{\exp\{-\zeta_i(t+1)\}}{\exp(-\zeta_i t)} = \exp(-\zeta_i) \end{aligned} \quad (13)$$

と表される。一方、期間 $[t, t+1]$ 中に実用化が実現する確率は、

$$\pi_i^{t,t+1} = 1 - \tilde{\pi}_i^{t,t+1} = 1 - \exp(-\zeta_i) \quad (14)$$

と表せる。指数ハザードモデルを利用した時、推移確率は時刻 t に依存しない。そこで、 $\tilde{\pi}_i^{t,t+1} = \tilde{\pi}_i$ 、 $\pi_i^{t,t+1} = \pi_i$ と表現する。この時、時刻 t において、OPシステム*i* ($i = 1, \dots, I$)の導入可能状態 $\gamma_i(t) = 0$ あるいは $\gamma_i(t) = 1$ から、時刻 $t+1$ に導入可能状態 $\gamma_i(t+1) = 0, 1$ に推移する確率は、マルコフ推移確率行列

$$\mathbf{P}_i = \begin{pmatrix} \tilde{\pi}_i & \pi_i \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

で表される。時点 τ_0 において、OP技術が実現していないという条件の下で、時点 t ($t \geq \tau_0 + 1$)において、はじめて実用化される確率は

$$p_i(t : \tau_0) = \pi_i (\tilde{\pi}_i)^{t-\tau_0-1} \quad (i \in \mathcal{F}^c(\tau_0)) \quad (16)$$

と表される。したがって、時刻 τ_0 にOPシステムメニュー $\mu(\tau_0)$ を導入した場合に獲得可能なOPシステムの期待

純便益の割引当該価値 (以下, メニュー価値と呼ぶ) は,

$$R(\boldsymbol{u}(\tau_0), \boldsymbol{\gamma}(\tau_0)) = \sum_{t=\tau_0}^T \sum_{i \in \mathcal{H}(\boldsymbol{u}(\tau_0))} \eta^{(t-\tau_0)} p_i(t; \tau_0) W_i^*(t) \quad (17)$$

と表される. ただし, ρ は割引率, $\mathcal{H}(\boldsymbol{u}(\tau_0))$ は, 式(2)で定義されるように, OPシステムメニュー $\boldsymbol{u}(\tau_0)$ に含まれるOPシステムの集合である. $W_i^*(t)$ はOPシステム i が時点 t で実現した時に, 最適にOPシステム i を導入することによって得られる最適純便益であり,

$$W_i^*(t) = \max_{\tau_i} \{W_i(\tau_i, t)\} \quad (18)$$

と表される. 他方, 時点 τ_0 にシステムを導入した場合, FDシステムがもたらす期待純便益の割引当該価値 (以下, FD価値と呼ぶ) は

$$Q(\tau_0) = \sum_{j=1}^J \left[\sum_{t=\tau_0}^T \eta^{(t-\tau_0)} (f_j^t - b_j^t) - D_j(\tau_0) \right] \quad (19)$$

と表される.

(4) システムの最適導入戦略

システムの最適導入戦略を定式化するため, 初期時点から一定期間にわたり, システムの導入を見送り, 時点 τ_0 に到達した場合を考える. 時点 τ_0 においては, 1) システムを導入する, 2) システムの導入を先送りする, という2つの選択肢がある. それぞれの選択肢を選択した場合に実現する情報システムの割引当該期価値を求める.

いま, 時点 τ_0 に導入する場合を考える. この場合, システム管理者は, システムに導入すべきOPシステムを選択しなければならない. 時刻 τ_0 において, システムに導入するOPシステムの内容を記述したメニュー戦略 $\boldsymbol{u}(\tau_0)$ を考える. ただし, OPシステムの導入可能性は, 当該期 τ_0 において, $\boldsymbol{\gamma}(\tau_0)$ に確定していると考え. メニュー戦略 $\boldsymbol{u}(\tau_0)$ を採用したときに発生する純便益の割引当該期価値 $\Omega(\boldsymbol{u}(\tau_0), \boldsymbol{\gamma}(\tau_0))$ は,

$$\begin{aligned} \Omega(\boldsymbol{u}(\tau_0), \boldsymbol{\gamma}(\tau_0)) &= Q(\tau_0) + R(\boldsymbol{u}(\tau_0), \boldsymbol{\gamma}(\tau_0)) - C_0(\tau_0, \boldsymbol{u}(\tau_0)) - B_0^{\tau_0} \\ &\quad (20) \end{aligned}$$

となる. ただし, $B_0^{\tau_0}$ は, 時点 τ_0 にシステムを導入した場合に発生する基幹システムの維持管理費用であり, 時点 t で発生する維持管理費用 d_0^t を用いて $B_0^{\tau_0} = \sum_{t=\tau_0}^T \eta^{t-\tau_0} d_0^t$ と表される. さらに, 時刻 τ_0 において, 最適メニューを求める問題は

$$\Omega^*(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0)) = \max_{\boldsymbol{u}(\tau_0)} \left\{ \Omega(\boldsymbol{u}(\tau_0), \boldsymbol{\gamma}(\tau_0)) \right\} \quad (21)$$

と定式化できる. つぎに, システムを導入しない場合を考える. この場合, 時点 t において, 便益も費用も発生しない. 時点 $\tau_0 + 1$ において, 再びシステムの導入

戦略を決定する問題に直面する. いま, 時点 $\tau_0 + 1$ の間に推移可能な導入可能状態ベクトルを $\boldsymbol{\gamma}(\tau_0 + 1) = \{\gamma_1(\tau_0 + 1), \dots, \gamma_I(\tau_0 + 1)\}$ と表す. 導入可能状態ベクトルは, OPシステム $i \in \mathcal{F}^c(t)$ に関して, $\gamma_i(\tau_0 + 1)$ の値が0もしくは1の状態を想定するとともに, すべての $i \in \mathcal{F}^c(t)$ に関して網羅的に組み合わせることにより得られる. ただし, $i \in \mathcal{F}(t)$ であるOPシステムに関しては, すでに τ_0 において $\gamma_i(\tau_0) = 1$ が成立しており, 時点 $\tau_0 + 1$ においても $\gamma_i(\tau_0 + 1) = 1$ が成立しなければならない. このように, 時点 $\tau_0 + 1$ において成立しうる導入可能ベクトルは, 時点 τ_0 における導入可能ベクトルの実現値 $\boldsymbol{\gamma}(\tau_0)$ に依存している. このことを明示的に表現するため, 時点 $t + 1$ において実現可能な導入可能ベクトル集合を $\Xi(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0))$ と表現する.

OPシステムの導入可能状況が, 時点 τ_0 における $\boldsymbol{\gamma}(\tau_0)$ から, 時点 $\tau_0 + 1$ において $\boldsymbol{\gamma}(\tau_0 + 1)$ に推移する確率 $q_{\boldsymbol{\gamma}(\tau_0+1)}(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0))$ ($\boldsymbol{\gamma}(\tau_0 + 1) \in \Xi(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0))$)は

$$q_{\boldsymbol{\gamma}(\tau_0+1)}(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0)) = \prod_{i \in \mathcal{F}^c(\tau_0)} \pi_i^{\gamma_i(\tau_0+1)} (1 - \tilde{\pi}_i)^{(1-\gamma_i(\tau_0+1))} \quad (22)$$

と表される. この時, 時点 τ_0 にシステムを導入を見送り, 時点 $\tau_0 + 1$ に $\boldsymbol{\gamma}(\tau_0 + 1) \in \Xi(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0))$ が実現し, それ以降の時点において最適システム導入戦略を採用した場合に獲得できるOPシステムの部分純便益の当該期価値を $V^*(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0 + 1))$ と表す. この時, 時点 τ_0 にシステムを導入を見送った時に獲得できるOPシステムの期待純便益の当該期価値は

$$\begin{aligned} \Psi^*(\tau_0 + 1) &= \sum_{\boldsymbol{\gamma}(\tau_0+1) \in \Xi(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0))} q_{\boldsymbol{\gamma}(\tau_0+1)}(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0)) V^*(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0 + 1)) \\ &\quad (23) \end{aligned}$$

と表される. したがって, 時点 τ_0 ($\tau_0 = 0, \dots, T - 1$)におけるシステム導入部分問題は

$$V^*(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0)) = \max \left\{ \Omega^*(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0)), \eta \Psi^*(\tau_0 + 1) \right\} \quad (24)$$

と定式化される. 部分問題(24)の右辺に含まれる $\Psi^*(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0 + 1))$ は, 式(23)で示すように最適値関数 $V^*(\boldsymbol{\gamma}(\tau_0 + 1))$ が含まれており, 再帰的関数方程式になっている.

(5) 最適システム更新モデルの定式化

以上の議論では, 既存の情報システムが存在せず, 新たに情報システムを導入する場合を想定していた. 本研究の適用事例でとりあげるように, 現実にはすでに情報システムが存在しており, 既存の情報システムを新しいシステムに切り替えることが問題になっている場合が少なくない. この場合, **2. (2)**で議論したよう

に、既存システムの陳腐化を明示的にモデル化することが必要となる。本研究では、既往システムの陳腐化が発生する理由として、1) 既往システムの物理的劣化が進展し、システムの維持費用が高くなること、2) 現行のFDシステムの技術が低水準であり、施設利用者が十分な便益を得ていないこと、3) 新しいOPシステムが導入可能でないこと、をとりあげる。

再び、初期時点 $t = 0$ を起点とする離散時間軸を考える。時刻 τ_0 まで、既存情報システムを継続的に利用してきた場合を考える。その上で、時点 τ_0 において、「新しいシステムに更新すべきかどうか」を検討する問題をとりあげる。この場合、時点 τ_0 において、システム管理者は、1) システムを更新する、2) システム更新を保留し、既存システムを少なくとも1期間継続して使用する、という選択肢が導入可能である。システムを更新する場合、式(21)で表される期待純便益 $\Omega^*(\gamma(\tau_0))$ を獲得する。一方、システムの更新を保留した場合、既存システムの維持管理費用 $b_i(\tau_0)$ が発生する。維持管理費用は、時間が経過するほど逓増すると考える。既存システムには、技術水準が低いFDシステムが導入されている。旧システムがもたらす便益は \underline{f}_j ($j = 1, \dots, J$) であり、新システムの便益 f_j と比較して $f_j > \underline{f}_j$ が成立する。さらに、既存システムにはOPシステムは導入されておらず、OPシステムによる便益は発生しない。この時、時点 τ_0 において、既存システムを継続利用することにより獲得できる期待純便益は

$$H^*(\tau_0) = \sum_{j=1}^J \left(\underline{f}_j - b_j(\tau_0) \right) - b_0(\tau_0) + \eta \Psi^*(\tau_0 + 1) \quad (25)$$

と表される。ただし、 $b_j(\tau_0)$ ($j = 1, \dots, J$)、 $b_0(\tau_0)$ は時点 τ_0 におけるFDシステム、基幹システムの維持管理費用である。 $\Psi^*(\tau_0 + 1)$ は、式(24)で定義される。この時、最適システム更新モデルは、

$$V^*(\gamma(\tau_0)) = \max \left\{ \Omega^*(\gamma(\tau_0)), H^*(\tau_0) \right\} \quad (26)$$

と定式化できる。部分問題(24)と同様に、式(26)は最適値関数 $V^*(\gamma(\tau_0))$ に関する再帰的関数方程式になっている。

4. 最適システム更新モデルの解法

(1) モデルの基本構造

最適システム更新モデルは、1) 各OPシステムの最適導入タイミングを求める部分問題(部分問題1)、2) システム更新時点を与件としてOPシステムメニューを求める部分問題(部分問題2)、および3) システムの更新タイミングを検定する主問題で構成される。これら

3つの問題は、それぞれ

$$W_i^*(t) = \max_{\tau_i \geq t} \{ W_i(\tau_i, t) \} \quad (27a)$$

$$\Omega^*(\gamma(\tau_0)) = \max_{\boldsymbol{\mu}(\tau_0)} \left\{ \Omega(\boldsymbol{\mu}(\tau_0), \gamma(\tau_0)) \right\} \quad (27b)$$

$$V^*(\gamma(\tau_0)) = \max \left\{ \Omega^*(\gamma(\tau_0)), H^*(\tau_0) \right\} \quad (27c)$$

と定式化できる。ただし、

$$W_i(\tau_i, t) = \sum_{r=\tau_i \geq t}^T \eta^{(r-t)} (c_i^r - b_i^r) - \eta^{(\tau_i-t)} C_i(\tau_i) \quad (28a)$$

$$\Omega(\boldsymbol{\mu}(\tau_0), \gamma(\tau_0)) = Q(\tau_0) + R(\boldsymbol{\mu}(\tau_0), \gamma(\tau_0)) - C_0(\tau_0, \boldsymbol{\mu}(\tau_0)) - B_0^{\tau_0} \quad (28b)$$

$$Q(\tau_0) = \sum_{j=1}^J \left[\sum_{t=\tau_0}^T \eta^{(t-\tau_0)} (f_j^t - b_j^t) - D_j(\tau_0) \right] \quad (28c)$$

$$R(\boldsymbol{\mu}(\tau_0), \gamma(\tau_0)) = \sum_{t=\tau_0}^T \sum_{i \in \mathcal{H}(\boldsymbol{\mu}(\tau_0))} \eta^{(t-\tau_0)} p_i(t : \tau_0) W_i^*(t) \quad (28d)$$

$$H^*(\tau_0) = \sum_{j=1}^J \left\{ \underline{f}_j - b_j(\tau_0) \right\} - b_0(\tau_0) + \eta \sum_{\gamma(\tau_0+1) \in \Xi(\gamma(\tau_0))} q_{\gamma(\tau_0+1)}(\gamma(\tau_0)) V^*(\gamma(\tau_0 + 1)) \quad (28e)$$

である。この内、部分問題1(式(27a)参照)、部分問題2(式(27b)参照)は、通常最適化問題である。主問題(式(27c))は、再帰方程式で定義されており、部分問題1、部分問題2の最適解を求めることにより、主問題に含まれる関数形を特定化することができる。その結果、最適システム更新モデルは、再帰方程式(27c)で記述される確率動的計画問題に帰着される。

(2) 解法

最適システム更新モデルは、標準的な確率動的計画問題であり、動的計画法の解法を用いて解くことができる。時点 τ_0 におけるOPシステムの実用可能性を表すベクトルを $\gamma(\tau_0) \in \Xi$ と表す。最適値関数 $V^*(\gamma(\tau_0))$ は、状態変数 $\gamma(\tau_0) \in \Xi$ の関数として表現することができる。確率動的計画問題を解くためには、主問題に含まれる部分問題を逐次解くことが必要となる。図-3には、アルゴリズムの概要を整理しているが、解法の手順は下記のように整理できる。

ステップ1: 最終期 $\tau_0 = N$ に着目する、終端条件として、すべての $\gamma(N) \in \Xi$ に対して $V^*(\gamma(N)) = 0$ 、 $W_i^*(N) = 0$ と設定する。 $\tau_0 = N - 1$ として**ステップ2**へ進む。

ステップ2: 最適値関数 $V(\gamma(\tau_0 + 1))$ を与件とする。 $\gamma_i(\tau_0) = 1$ である i に関して、式(27a),(28a)を用いて

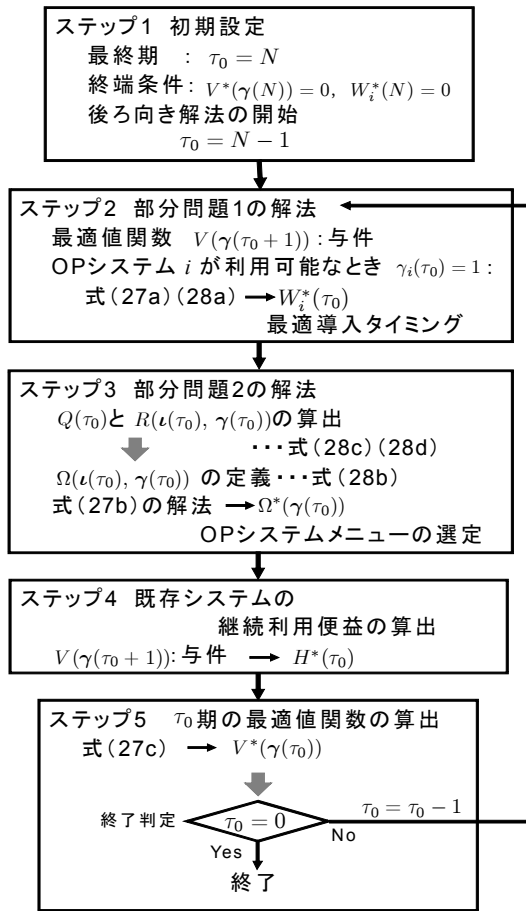


図-3 最適システム更新モデルの解法

$W_i^*(\tau_0)$ を求める。

ステップ3: 式(28c),(28d)を用いて $Q(\tau_0)$, $R(u(\tau_0), \gamma(\tau_0))$ を求める。その上で、式(28b)を用いて、 $\gamma(\tau_0) \in \Xi$ に対して、 $\Omega(u(\tau_0), \gamma(\tau_0))$ を定義する。すべての $\gamma(\tau_0)$ に対して問題(27b)を解き、 $\Omega^*(\gamma(\tau_0))$ を求める。

ステップ4: $\tau_0 + 1$ に対して求めた最適値関数値 $V^*(\gamma(\tau_0 + 1))$ を用いて、すべての $\gamma(\tau_0) \in \Xi$ に対して、 $H^*(\tau_0)$ を定義する。

ステップ5: 式(27c)より、最適値関数 $V^*(\gamma(\tau_0))$ を求める。 $\tau_0 = 0$ であれば、アルゴリズムを終了する。そうでない場合、 $\tau_0 = \tau_0 - 1$ として、ステップ2へ戻る。

(3) リアルオプション価値

本研究では、情報システムの技術革新により、1) 情報システムの導入費用が低下するため、より安価に高性能の情報システムを導入できる、2) 新しい技術が開発されることにより、いままでにない新しいサブシステムを導入できるようになる場合を想定している。さらに、OPシステムの実用化時点に不確実性が存在するために、1) 更新時点を遅らせることにより発生する情報オプションと、2) 将来の拡張可能性を考慮すること

により生じる拡張オプションが存在する。本節では、以上の2つのリアルオプション価値をモデル化する。

a) 情報オプション価値

時点 τ_0 において、情報システムの更新を見送り、意思決定を1期間留保することにより得られる便益である。最適システム更新問題(26)より、システム導入を1期間遅らせることにより得られる情報オプション価値は

$$OP_{inform}(\gamma(\tau_0)) = \Omega^*(\gamma(\tau_0)) - H^*(\tau_0) \quad (29)$$

と表される。最適システム更新問題の構造より、 $OP_{inform}(\gamma(\tau_0)) < 0$ が成立する場合、システムの更新を留保することが望ましい。

b) 拡張オプション価値

情報システムを更新した時点 τ_0^* において、OPシステムメニューが $u^*(\tau_0^*)$ に決定したと考える。OPシステムメニューに含まれるシステムの中には、実用化されることが確定していないシステムも存在する。OPシステムは、単独には効果を発揮せず、基幹システムに導入されることにより、効果を発揮すると仮定する。したがって、OPシステムが実用化されれば基幹システムに導入できるように、基幹システムに余剰容量を確保しておくことが必要となる。もちろん、目標年次までにシステムが実用化されなければ、必要以上の処理能力を維持するという非効率性が発生する。しかし、システムが実用化された段階で、システム接続の可能性が残されていなければ、システム導入により本来獲得できたOPシステムの便益を活用できないという機会費用が発生する。このように情報システムの拡張可能性を担保しておくことがもたらす経済価値を拡張オプション価値と呼ぶ。

いま、1) すべてのOPシステムを導入しない場合、2) OPシステムメニュー $u^*(\tau_0^*)$ の中で、システム*i*のみを導入しない場合を考える。これら2つのケースにおける基幹システムの更新費用を、それぞれ $C_0(\tau_0^*, u_\phi(\tau_0^*))$, $C_0(\tau_0^*, u_{-i}^*(\tau_0^*))$ と表す。まず、OPシステムメニュー $u^*(\tau_0^*)$ の導入可能性を確保する拡張オプション価値 $OP_e(u^*(\tau_0^*) : \gamma(\tau_0^*))$ は

$$OP_e(u^*(\tau_0^*) : \gamma(\tau_0^*)) = \sum_{i \in \mathcal{H}} R(u^*(\tau_0^*), \gamma(\tau_0^*)) - \Delta C(u^*(\tau_0^*)) \quad (30)$$

と表される。上式において、 $\Delta C(u^*(\tau_0^*))$ は、OPシステムメニュー $u^*(\tau_0^*)$ の導入可能性を確保するために必要となる追加的費用であり、

$$\Delta C(u^*(\tau_0^*)) = C_0(\tau_0^*, u^*(\tau_0^*)) - C_0(\tau_0^*, u_\phi(\tau_0^*)) \quad (31)$$

と定義される。つぎに、OPシステム $i \in \mathcal{H}(u^*(\tau_0^*))$ の

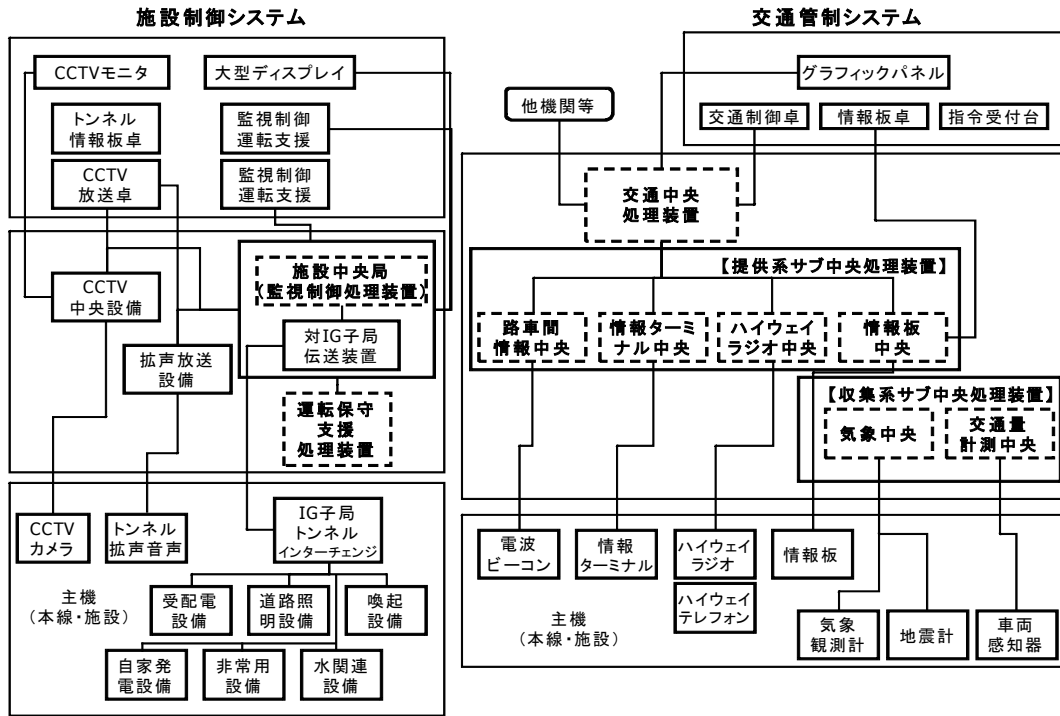


図-4 交通管制情報システム全体系統図

導入可能性を確保することにより獲得できるOPシステム*i*の拡張オプション $OP_e^i(\mathcal{L}_{-i}^*(\tau_0^*) : \gamma(\tau_0^*))$ を

$$OP_e^i(\mathcal{L}_{-i}^*(\tau_0^*) : \gamma(\tau_0^*)) = \sum_{t=\tau_0}^T \eta^{(t-\tau_0)} p_i(t : \tau_0) W_i^*(t) - \Delta C(\mathcal{L}_{-i}^*(\tau_0^*)) \quad (32)$$

と定義する。ただし、 $\Delta C(\mathcal{L}_{-i}^*(\tau_0^*))$ は、OPシステム*i*を導入するために必要となる追加的費用であり、

$$\Delta C(\mathcal{L}_{-i}^*(\tau_0^*)) = C_0(\tau_0^*, \mathcal{L}^*(\tau_0^*)) - C_0(\tau_0^*, \mathcal{L}_{-i}^*(\tau_0)) \quad (33)$$

と定義できる。情報システムの容量増加に関して、規模の経済性が存在する(容量増加の追加的費用が、情報システム容量が大きいほど減少する)場合、

$$OP_e(\mathcal{L}^*(\tau_0^*) : \gamma(\tau_0^*)) \geq \sum_{i \in \mathcal{H}(\mathcal{L}^*(\tau_0^*))} OP_e^i(\mathcal{L}_{-i}^*(\tau_0^*) : \gamma(\tau_0^*)) \quad (34)$$

が成立する。

5. 適用事例

(1) 適用事例の概要

本研究で提案した最適システム更新モデルを、中日本高速道路株式会社横浜支社が管理する交通管制情報システムの更新問題に適用する。同支社の交通管制情報システムは、現在基幹システムと9つのサブシステムにより構成されている。同システムは、1990年に現在

の交通管制情報システムに一括更新された。その後、基幹システムのみが、供用後13年経過した時点で、一度更新されている。いずれのシステムも前回の更新時から時間が経過しており、システムの陳腐化が進展している。それと同時に、現行のシステムを構成する機器や部品の老朽化が進展し、システムの故障確率が経年的に増加している。また、現行システムの機器・部品の在庫が乏しくなっており、故障時における取替え費用や復旧時間が増加している。現行の交通管制情報システムは、東名高速道路の東京IC～三ヶ日IC間、小田原厚木道路、西湘バイパス、箱根新道、新湘南道路の範囲を対象として、交通情報の収集・提供を行っている。今後、第2東名高速道路の開通が計画されており、既存の交通管制情報システムに対する負荷の増大による処理能力の低下が懸念されることから、交通管制情報システムの合理的な更新政策の検討が求められている。

以上の問題意識の下に、山本等は、現行システムの動的故障解析を行い、ライフサイクル費用の最小化やリスク影響度の観点から、基幹システムとサブシステムの更新・集約化を実施することが望ましいことを明らかにしている^{20),17)}。しかし、ここではライフサイクル費用、リスク影響度の観点から、既存システムの更新・集約政策の分析に留まっており、情報システム技術の陳腐化や情報システムがもたらす便益に関しては考慮していない。しかし、施設利用者(ドライバー)の

表-1 サブシステム・メニュー

種別	細目	
基幹システム	交通中央局等※	
FDシステム	FD-1	テレビカメラ (交通流監視装置) を活用した警告システム
	FD-2	空き駐車マスへの誘導
	FD-3	LEDを用いた空き駐車マスへの誘導
	FD-4	次世代情報ターミナル
	FD-5	インターチェンジ・休憩施設における車両計測
	FD-6	ハイウェイラジオの連続化
	FD-7	高機能図形情報板
	FD-8	全線監視用テレビカメラ
	FD-9	画像処理技術の高度化
	FD-10	情報提供パターンの複数化
	FD-11	気象急変地域における情報提供・収集機器配置
OPシステム	OP-1	ITS 車載器を活用した警告
	OP-2	ETC 車載器を活用した警告
	OP-3	ETCを活用した休憩施設の情報収集・提供
	OP-4	予測情報 (渋滞伸縮・通行止め解除見込み) の提供
	OP-5	移動式カメラの開発
	OP-6	ETC 車載器, ITS 車載器情報を活用した予測旅行時間計測
	OP-7	八王子支社の集約

※基幹システムは、交通中央局のほか、情報板中央局、ハイウェイラジオ中央局、情報ターミナル中央局、トラカン中央局、気象中央局から構成される。

高速道路の交通機能サービスに関するニーズは多様化、高度化しており、様々な新しい交通機能サービスの導入が求められている。これらの交通機能サービスの中には、現時点で直ちに対応可能なものや、直ちに実現できないものの近い将来に実現可能なサービスも存在する。したがって、交通管制情報システムの更新・集約戦略を検討する場合、情報システムの高度化がもたらす利用者便益や新しい情報技術の導入可能性も考慮しながら、情報システムに導入するシステムメニューや更新タイミングを決定することが必要となる。

現行の交通管制情報システムは、**図-4**に示すように施設制御システムや交通管制システムとそれを支える数多くのサブシステムで構成される。筆者等は、前稿において、ライフサイクル費用、およびリスク影響度の観点から、これらのサブシステムを集約することが望ましいことを明らかにしている¹⁷⁾。本適用事例では、これら既存のサブシステムを新しい交通管制情報システムに集約することを前提として議論を進める。そこで、現行のサブシステムは、新しい交通管制情報システムを構成するFDシステムと位置づける。さらに、現行の情報システムには導入されていないが、現時点、もしくは近い将来に導入が可能となる新しいサブシステムとして、**表-1**に示すような7つのOPシステムを考慮す

表-2 交通機能サービス特性

特性	内容
注意喚起 (7.40)	渋滞や事故が多発する箇所の手前の本線に道路情報板やハイウェイラジオ等を増設し、ドライバーに注意喚起を行うことにより、渋滞末尾車両への追突や2次的事故の発生を防止する。
ボトルネック対策 (4.86)	渋滞が多発する箇所の手前に道路情報板やハイウェイラジオ等を設置し、走行速度が低下している車両のドライバーへ速度を上げるように注意喚起を行うことにより、交通情報の発生を防止する。
渋滞回避 (4.86)	JCTやインターチェンジ手前に道路情報板やハイウェイラジオ等を設置し、ドライバーへ他路線あるいは一般道を経由した場合の主要地点までの所用時間を提供することにより、渋滞を回避して頂くとともに、渋滞長の延伸を抑制する。
現況報告 (7.27)	渋滞多発箇所に道路情報板やハイウェイラジオ等を設置し、渋滞に巻き込まれたドライバーに所要時間情報や渋滞長等をきめ細かく提供することにより、不快感を緩和する。
旅行計画支援 (0.59)	出発前のドライバーに他路線あるいは一般道を経由した場合の主要地点までの所用時間を携帯電話サイトより提供することにより、渋滞を回避して頂くとともに、渋滞長の延伸を抑制する。
防災・減災 (1.67)	気象庁から提供される緊急地震速報情報等をサービスエリアで提供することにより、大規模地震の発生によるお客様の事故を防止する。
利便性向上 (7.74)	行楽情報・ニュース等の各種情報を提供したり、インターネット接続環境を提供することにより、サービスエリアの利便性を向上する。
観光・交流支援 (20.14)	観光情報等の提供や既存のIC間に出入口を設置することにより周辺地域へのアクセスを可能にする。
国際化 (14.12)	外国人ドライバーが把握できる多言語の情報提供を行うことにより、国際化による活力の向上を図る。

注) ()内の数字はドライバーの1トリップ当たりのWTP (円/回) を表す。

ることとした。これらOPシステムは現時点で直ちに導入可能ではないが、近い将来に実用化が可能なシステム技術を表している。中日本高速道路株式会社横浜支社では、交通管制情報システムの高度化の目標として、**表-2**に示すような交通機能サービス特性を掲げている。さらに、**表-1**に示した11個のFDシステムと7個のOPシステムの導入が、**表-2**に示した交通機能サービス特性の高度化にどのように貢献するかを**図-5**に示すように整理している。同図の右側の欄には、導入対象となるサブシステム群を示している。中央には、交通管制情報システムのフルセットメニューの導入により達成可能な詳細なサービス特性が示されている。なお、交

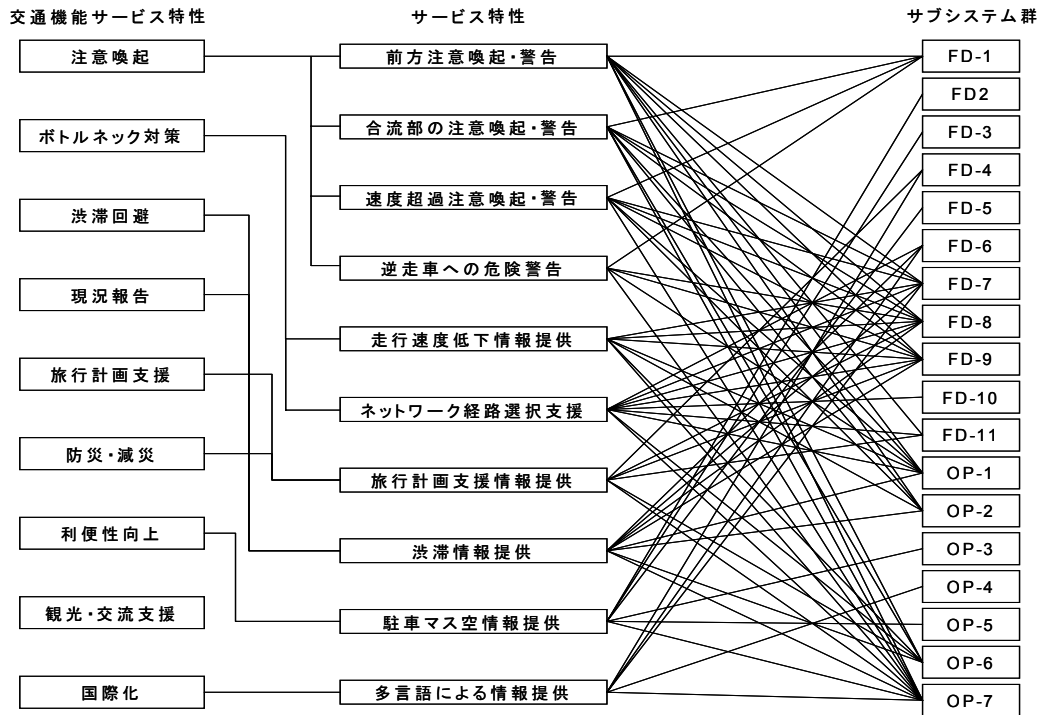


図-5 交通機能サービス特性とサブシステムの関係

交通機能サービス特性の「観光・交流支援」については、本適用事例の検討対象であるサブシステム群の整備にて実現化するものではないため、サービス特性およびサブシステムとの関係を示していない。

(2) ドライバーの認知構造

現時点においてサブシステムの導入が、利用者行動に及ぼす影響を分析できるようなシミュレーション技術は開発されていない。したがって、各サブシステムが提供する交通機能サービス特性の便益をCVM (Contingent Valuation Method) 手法²¹⁾を用いて計測した。その際、ドライバーが認知する交通管制情報システムの便益を把握するため、ドライバーの交通機能サービス特性に関する認知構造を共分散構造モデルで分析することとした。その上で、ドライバーの各交通機能サービス特性に対する支払い意思額 (Willingness To Pay; 以下、WTPと略記) をCVMを用いて計測することにより、各サブシステムの導入便益を測定するという方法²²⁾を採用した。まず、ドライバーの交通管制情報システム導入に対する認知構造を把握するために、平成19年12月15日(土)、海老名SA、足柄SA、牧之原SAにおいてドライバー533人に対してヒアリング調査を実施した。ヒアリング調査では、1) ドライバーの年齢、使用している自動車の種類、性別、トリップの目的等のドライバーの特性、2) 交通機能サービス特性 (表-2に参照) に関

する必要性、3) 交通管制情報システムの導入に対するWTPについて尋ねている。ドライバーに対するヒアリング調査では、表-2に示す9つの交通機能サービス特性およびそれらの内容について調査員が詳細に説明を行った。その際、各交通機能サービス特性の内容は、交通管制情報システムを導入した場合に実現する外部経済も含めたサービス特性を示したものであり、説明内容が交通サービス特性を正確に反映し、かつ被験者がその内容を理解できる限りにおいて、CVM手法を用いて交通管制情報システムの便益を評価することが可能である。多くのCVM調査結果で報告されているように、CVM手法による経済便益の推計精度には限界があるのも事実であり、CVM手法に基づいた分析結果は意思決定のための1つの判断情報を提供するにすぎないことはいうまでもない。表-2の左側の欄には、交通管制情報システムの交通機能サービス特性を列挙している。ヒアリング調査では、各ドライバーに、個々の交通機能サービス特性に対して、「1) 必要である」、「2) やや必要」、「3) どちらでもない」、「4) やや必要である」、「5) 必要でない」という5個のカテゴリの中から1つを選択して頂いた。

以上のヒアリング調査結果に基づいて、共分散構造モデルの1つであるMIMICモデル (Multiple Indicator Multiple Cause Model) ²³⁾を用いて、ドライバーの交通機能サービス特性に対する認知構造をモデル化した。

MIMICモデルの詳細は参考文献23)に譲るが、本研究で採用したCVMモデルを説明するために、MIMICモデルの概要を説明する。MIMICモデルでは、複数の観測変数によって構成概念変数(潜在変数)が規定され、その構成概念変数が複数の観測変数の原因となっていると考える。構成概念変数は実際には観測されないが、観測変数間に相関をもたらす潜在的な共通原因を表している。本研究では、交通機能サービス特性の必要性に基づいてドライバーの認知構造を分析している。したがって、構成概念変数はドライバーが認知する交通機能サービス特性の必要性を集約的に表現したものであり、多様な交通機能サービス特性を提供するOPシステムの便益を構成概念変数を用いて総合的に表現していると考えることができる。

いま、ドライバーの属性を表す変数をサイズ($n_x \times 1$)の列ベクトル $\mathbf{x}' = (x^1, \dots, x^{n_x})$ 、交通機能サービス特性に対する回答をサイズ($n_y \times 1$)の列ベクトル $\mathbf{y}' = (y^1, \dots, y^{n_y})$ を用いて表現する。「 Γ 」は、転置ベクトルであることを表している。ここで、期待値を \mathbf{o} に規準化した観測変数ベクトル

$$\mathbf{z}_x = \mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_x \quad (35a)$$

$$\mathbf{z}_y = \mathbf{y} - \boldsymbol{\mu}_y \quad (35b)$$

を定義する。ただし、 $\boldsymbol{\mu}_x$ は、観測変数ベクトル \mathbf{x} の期待値列ベクトル、 $\boldsymbol{\mu}_y$ は、観測変数ベクトル \mathbf{y} の期待値列ベクトルである。また、ドライバーの構成概念変数をサイズ($n_\eta \times 1$)の列ベクトル $\boldsymbol{\eta}' = (\eta^1, \dots, \eta^{n_\eta})$ で表す。潜在変数の期待値は0、分散は1に規準化している。さらに、構造変数ベクトルを \mathbf{t} と表す。ただし、 $\mathbf{t}' = [\boldsymbol{\eta}', \mathbf{z}'_x, \mathbf{z}'_y]$ である。また、 $\mathbf{u}' = [\boldsymbol{\zeta}', \mathbf{d}', \mathbf{e}']$ は残差ベクトルであり、 $\boldsymbol{\zeta}, \mathbf{d}, \mathbf{e}$ は、それぞれ、構造変数ベクトル $\boldsymbol{\eta}, \mathbf{x}, \mathbf{y}$ に対応する残差ベクトルを表す。共分散構造モデル(MIMICモデル)は、構造変数ベクトル \mathbf{t} と残差ベクトル \mathbf{u} を用いて定式化できる。

MIMICモデルにおける未知パラメータ行列の非ゼロパラメータを一列に並べたパラメータベクトルを $\boldsymbol{\theta}$ と表す。また、観測変数ベクトルを $\mathbf{w}' = [\mathbf{x}', \mathbf{y}']$ 、観測変数の期待値で構成したベクトルを $\boldsymbol{\mu}' = [\boldsymbol{\mu}'_x, \boldsymbol{\mu}'_y]$ と表現する。このとき、観測変数の共分散構造は、

$$\boldsymbol{\Sigma} = E[(\mathbf{w} - \boldsymbol{\mu})(\mathbf{w} - \boldsymbol{\mu})'] \quad (36)$$

と表わされる。ただし、観測変数の共分散行列 $\boldsymbol{\Sigma} = \mathbf{u}\mathbf{u}'$ は、パラメータ $\boldsymbol{\theta}$ を用いて構造化されていることを明示的に示すために、 $\boldsymbol{\Sigma}$ を $\boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{\theta})$ と表記する。構造方程式モデルでは、観測変数 \mathbf{w} が多変量正規分布に従っているものと仮定する。いま、ドライバー i のデータ(観測変数) $\bar{\mathbf{w}}_i = [\bar{\mathbf{x}}_i, \bar{\mathbf{y}}_i]$ が導入可能であると考え。パラメータ $\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\theta}$ を所与として、観測変数の組 $\bar{\mathbf{w}}_i = [\bar{\mathbf{x}}_i, \bar{\mathbf{y}}_i]$ が観測

表-3 因子分析結果

	因子負荷量		
	ξ_1	ξ_2	ξ_3
注意喚起	0.578	0.015	0.030
ボトルネック対策	0.381	0.284	-0.072
渋滞回避	0.702	-0.170	0.194
現況報告	0.346	0.473	-0.176
旅行計画支援	-0.137	0.677	-0.081
防災・減災	0.175	0.350	0.164
利便性向上	-0.149	0.385	0.309
観光・交流支援	0.102	-0.146	0.641
国際化	0.075	0.082	0.316
χ^2 検定統計量	20.671		
p 値	0.0554		

される確率は、

$$f(\bar{\mathbf{w}}_i | \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\theta}) = (2\pi)^{-\frac{n}{2}} |\boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{\theta})|^{-\frac{1}{2}} \exp \left[-\frac{1}{2} (\bar{\mathbf{w}}_i - \boldsymbol{\mu})' \boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{\theta})^{-1} (\bar{\mathbf{w}}_i - \boldsymbol{\mu}) \right] \quad (37)$$

と表される。このとき、すべての観測変数の組 $\bar{\mathbf{w}} = \{\bar{\mathbf{w}}_i (i = 1, \dots, I)\}$ が同時に生起する確率密度関数(尤度関数)は、

$$\mathcal{L}(\bar{\mathbf{w}}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\theta}) = \prod_{i=1}^I f(\bar{\mathbf{w}}_i | \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\theta}) \quad (38)$$

と表せる。対数尤度関数は、

$$\begin{aligned} \ln[\mathcal{L}(\bar{\mathbf{w}}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\theta})] &= \sum_{i=1}^I \ln f(\bar{\mathbf{w}}_i | \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\theta}) \\ &= \frac{N}{2} \ln |\boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{\theta})^{-1}| \\ &\quad - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^I (\bar{\mathbf{w}}_i - \boldsymbol{\mu})' \boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{\theta})^{-1} (\bar{\mathbf{w}}_i - \boldsymbol{\mu}) \\ &\quad + \text{パラメータのない項} \end{aligned} \quad (39)$$

となる。若干の計算の結果、最尤推定法のための目的関数(適合度関数)は、

$$f_{ML} = -\text{tr}(\boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{\theta})^{-1} \mathbf{S}) + \log |\boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{\theta})^{-1}| \quad (40)$$

のように変形できる。ただし、記号trは対角和、 \mathbf{S} は、標本分散行列であり、

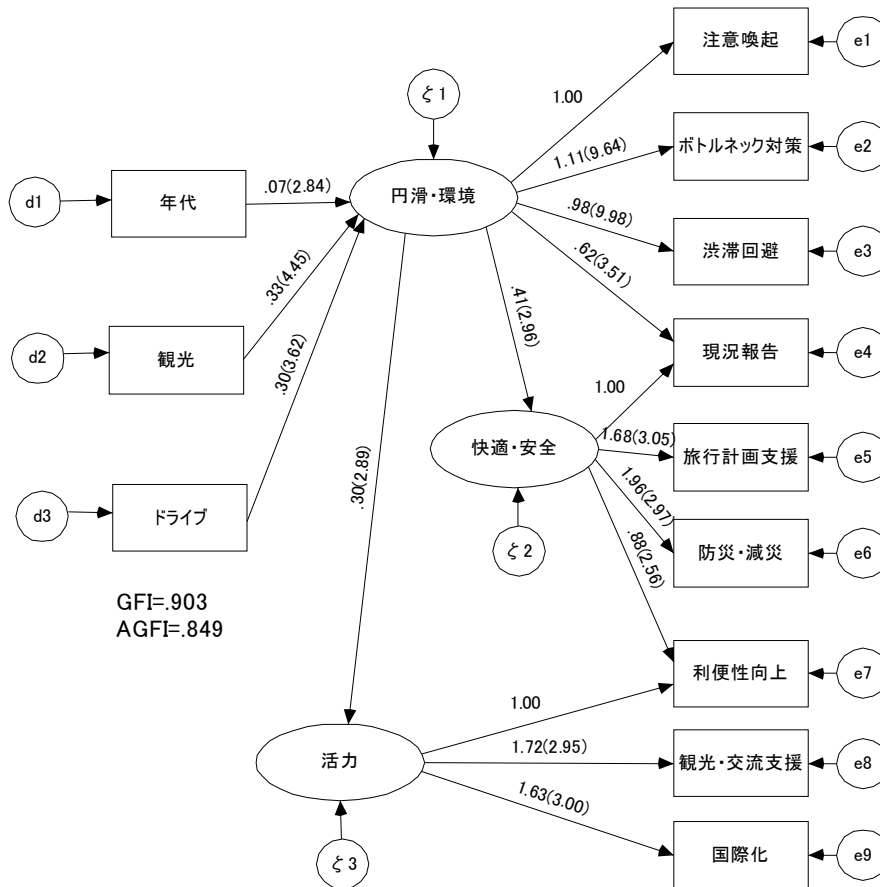
$$\mathbf{S} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^I (\bar{\mathbf{w}}_i - \hat{\mathbf{w}})(\bar{\mathbf{w}}_i - \hat{\mathbf{w}})' \quad (41)$$

と定義される。 $\hat{\mathbf{w}}$ は、 $\bar{\mathbf{w}}_i$ に関する標本平均である。式(40)を最大にするようなパラメータ値 $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \dots, \theta_S)$ の最尤推定量は、

$$\frac{\partial f_{ML}}{\partial \theta_s} = 0 \quad \text{for all } \theta_s \quad (42)$$

を同時に満足するようなパラメータ $\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_S)$ として与えられる。ただし、 $\theta_s (s = 1, \dots, S)$ は、パラメータベクトル $\boldsymbol{\theta}$ の各要素を示す。

MIMICモデルの作成にあたっては、ドライバーの認知構造を表す因果パスモデルを網羅的に作成し、各モ



注) 矢印に付随している数字は係数の推計値, 括弧内の数字はt-値を表す.

図-6 ドライバーの認識構造

デルの推計精度を検討しながら最終的なモデル構造を確定することが必要となる. 本研究における適用事例では, 交通機能サービス特性である9項目の観測変数の背後に, 「円滑・環境」, 「快適・安全」, 「活力」の3因子をおいた因子分析モデルを仮説として設定し, ドライバーの交通機能サービス特性に関するアンケート結果を用いて因子分析を行った. 表-3に因子分析の結果として, 交通機能サービス9項目の3因子(ξ₁~ξ₃)に対する因子負荷量を示している. さらにχ²検定統計量及びp値を同表に示している. χ²検定統計量が棄却域χ² ≥ χ_α²(12)を満足すれば, 有意水準α%で観測データの分散と因子分析モデルによる推計データの分散が等しいという帰無仮説が棄却される. 本適用事例では, 有意水準α = 0.05において, χ² < χ_α²(12) = 21.026が成立しており帰無仮説は棄却されず, 因子分析モデルの適合性が確保されている. 本因子分析の結果, 各々の交通機能サービス特性が各因子に対する因子負荷量の結果から, 因子1(ξ₁)が「円滑・環境」, 因子2(ξ₂)が「快適・安全」, 因子

3(ξ₃)が「活力」を強く表現していることが示される. さらに, 3因子を構成概念として設定したMIMICモデルを代替的に作成し, 個別のパスに関する符号条件やt-値, また修正適合度指標AGFI(Adjusted Goodness of Fit Index)を考慮して, もっとも推計精度が高くなるような変数とモデル構造を最終的に選択した. その結果, 図-6に示すようなMIMICモデルが, 最終的に選択された. 同図中には, 各パラメータ値および対応するt-値が記載されている. これより, すべての変数に対してt-値は1.96以上であり, 有意水準95%で説明変数の説明力を保証できる. 最終的なMIMICモデルでは, 高齢になるに従い, 「円滑・環境」への重要度が高く, またトリップ目的別ドライバー特性として, 「観光」および「ドライブ」が「円滑・環境」への影響度が強いことが示された. 一方, 「観光」, 「ドライブ」から, 「快適・安全」, 「活力」の2因子への矢印は因子分析の結果, いずれも有意ではないために削除された. ただし, 「円滑・環境」因子から, 「快適・安全」および「活力」因子へ

の説明力は有意であり、このことはドライバー特性が間接的に「快適・安全」および「活力」因子へ影響を及ぼしていることを示している。

(3) 支払い意思額 (WTP) の計測

以上で推計した構成概念変数を用いて、ドライバーの交通機能サービス特性に対するWTPを生存分析²¹⁾を用いて推計した。WTPに関するアンケート調査では、**図-7**に示すようなアンケートシートを作成し、ドライバーの交通管制情報システム導入に対するWTPを尋ねた。その際、**表-4**に示した3種類の金額提示による2段階2肢選択方式 (Double-Bounded Dichotomous Choice) を採用している。ここで、ドライバー*i*の支払い意思額 T_i が、ワイブル関数

$$G(T_i) = 1 - \exp(-\nu_i T_i^\alpha) \quad (43)$$

に従って分布すると考える。ここで、 α はスケールパラメータ、 ν_i は、ドライバー*i*の位置パラメータである。この時、2回の提示額に対してそれぞれの回答(k, j), ($k, j =$ 「Yes」, 「No」)が選択される確率 $\Pr[k/j]$ は、

$$\Pr[\text{Yes/Yes}] = \pi_i^{yy} = 1 - G(T_i^U) \quad (44a)$$

$$\Pr[\text{Yes/No}] = \pi_i^{yn} = G(T_i^U) - G(T_i^1) \quad (44b)$$

$$\Pr[\text{No/Yes}] = \pi_i^{ny} = G(T_i^1) - G(T_i^L) \quad (44c)$$

$$\Pr[\text{No/No}] = \pi_i^{nn} = G(T_i^L) \quad (44d)$$

と表すことができる。ただし、 T_i^1 はドライバー*i*に対する第1回目の提示額、 T_i^G, T_i^L は第2回目の提示額 (**図-7**参照)を表す。さらに、MIMICモデルの構成概念変数を用いて、ドライバー*i*の位置パラメータを

$$\nu_i = \beta_0 + \beta_1 x_i^1 + \beta_2 x_i^2 + \beta_3 x_i^3 \quad (45)$$

と表す。ここに、 $\beta_j (j = 0, \dots, 3)$ は未知パラメータ、 x_i^1, x_i^2, x_i^3 は、それぞれMIMICモデルを用いて評価したドライバー*i*の構成概念変数1~3の推計値である。以下、式(45)で表されるWTP関数をモデル1と呼ぶこととする。この時、WTP関数のパラメータは、対数尤度関数

$$\ln \mathcal{L} = \sum_{i=1}^N \{ d_i^{yy} \ln \pi_i^{yy} + d_i^{yn} \ln \pi_i^{yn} + d_i^{ny} \ln \pi_i^{ny} + d_i^{nn} \ln \pi_i^{nn} \} \quad (46)$$

を最大にするような $\hat{\alpha}, \hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3$ として求まる。ただし、 d_i^{yy} はドライバー*i*が2回とも賛成と答えたときに1、それ以外のときは0となるダミー変数であり、 $d_i^{yn}, d_i^{ny}, d_i^{nn}$ もそれぞれ同様のダミー変数である。 N はサンプル数を示す。

2段階2肢選択方式による3種類のCVM調査票を作成し、合計533サンプルの有効回答を得た。WTPモデルを推計した結果を**表-5**に示す。各構成概念変数に対応する説明変数の推計精度を表す*t*-値が1.96以上であ

2段階2肢選択方式

Q1. 高速道路における情報提供サービスは無料です。で新たな情報提供サービスが整備されてもお金を支払う必要はありません。仮に新たな情報提供サービスが導入された場合、そのサービスを利用できることは、あなたが普段の生活で情報を得るために費やす費用と比べてどのくらいの値打ちがあるかお尋ねします。1回あたり(T¹円)を支払っても利用する値打ちがあると思いますか?

- 1 はい
- 2 いいえ

Q2. では、T¹円ではなく、T^U円の値打ちがあると思いますか?

- 1 はい
- 2 いいえ

Q3. では、T¹円ではなく、T^L円の値打ちがあると思いますか?

- 1 はい
- 2 いいえ

図-7 CVM調査票

表-4 CVM提示額 (単位: 円)

バージョン	T _i ¹	T _i ^U	T _i ^L
A	100	200	50
B	200	300	100
C	300	500	100

注) T_i¹: 最初の提示額, T_i^U: 賛成と答えた場合の2回目の提示額, T_i^L: 対と答えた場合の2回目の提示額

表-5 支払い意思額モデルの推計結果

説明変数	モデル1		モデル2	
	推計値	t-値	推計値	t-値
定数項 β_0	0.0656	4.55	0.0658	4.56
円滑・環境 β_1	0.00791	0.615	-	-
快適・安全 β_2	-0.0169	-0.868	-	-
活力 β_3	-0.0622	-2.60	-0.0595	-3.73
α	0.597	14.43	0.596	14.43
対数尤度関数	-600.75		-601.16	
WTP平均値	118.9円		119.1円	
WTP中央値	51.9円		52.0円	

れば、有意水準95%で説明変数の説明力を保証できる。しかし、モデル1では、円滑・環境 β_1 、快適・安全 β_2 についての仮説検定では、帰無仮説 $\beta_1 = 0$ および $\beta_2 = 0$ を棄却できず、WTP関数モデルに対する説明力を確保できない。そこで、新たに $\beta_1 = \beta_2 = 0$ としたワイブル関数の位置パラメータ ν_i を、

$$\nu_i = \beta_0 + \beta_3 x_i^3 \quad (47)$$

と定式化した (以下、モデル2と呼ぶ)。モデル2の推計結果を**表-5**に併記している。モデル2におけるパラメータの推定値はいずれも説明力を有している。このようにモデル2では、構成概念変数 x_i^3 のみが取上げられており、他の構成概念変数 x_i^1, x_i^2 はドライバーのWTPに対して有意な説明力を有していない。しかし、このことは構成概念変数 x_i^1, x_i^2 がWTPに影響を及ぼさない

表-6 サブシステムの経済便益 (一部)

サービス内容	重み	便益 A	サブシステム	貢献度	便益 B	利用者数 10 ⁶ 人	補正係数				便益 C
							SAPA 立寄率	ETC 普及率	ITS 普及率	その他	
前方注意喚起	0.5	3.7	OP-1	1.0	0.66	146	100%	100%	2%	100%	2.11
			OP-2	0.1	0.07	146	100%	73%	100%	100%	7.04
			FD-1	0.4	0.26	146	100%	100%	100%	100%	38.59
			FD-7	0.6	0.40	146	100%	100%	100%	100%	57.88
			FD-8	1.0	0.66	146	100%	100%	100%	100%	96.46
			OP-5	0.1	0.07	146	100%	100%	100%	100%	9.67
			FD-9	1.0	0.66	146	100%	100%	100%	100%	96.46
			OP-6	0.8	0.53	146	100%	100%	2%	100%	1.69
合流部の注意喚起	0.2	1.48	FD-11	0.6	0.40	146	100%	100%	100%	100%	57.88
			OP-1	1.0	0.30	146	100%	100%	2%	100%	0.95
			OP-2	0.2	0.06	146	100%	73%	100%	100%	6.31
			FD-1	0.4	0.12	146	100%	100%	100%	100%	17.29
			FD-7	0.6	0.18	146	100%	100%	100%	100%	25.93
			FD-8	1.0	0.30	146	100%	100%	100%	100%	43.22
			FD-9	1.0	0.30	146	100%	100%	100%	100%	43.22
速度超過注意喚起	0.1	7.4	OP-6	0.8	0.24	146	100%	100%	2%	100%	0.76
			OP-1	1.0	0.18	146	100%	100%	2%	100%	0.58
			OP-2	0.1	0.02	146	100%	73%	100%	100%	1.92
			FD-1	0.4	0.07	146	100%	100%	100%	100%	10.54
			FD-7	0.6	0.11	146	100%	100%	100%	100%	15.81
			FD-8	1.0	0.18	146	100%	100%	100%	100%	26.35
逆走車への危険警告	0.2	1.48	FD-9	1.0	0.18	146	100%	100%	100%	100%	26.35
			OP-1	1.0	0.42	146	100%	100%	2%	100%	1.35
			OP-2	0.1	0.04	146	100%	73%	100%	100%	4.51
			FD-1	0.4	0.17	146	100%	100%	100%	100%	24.69
			FD-8	1.0	0.42	146	100%	100%	100%	100%	61.74
FD-9	1.0	0.42	146	100%	100%	100%	100%	61.74			

注) 表-2 に示す9個の交通機能サービス特性のうち、最初のサービス特性(注意喚起)を実現する各サブシステムの経済便益を計上した結果である。「注意喚起」という交通機能サービス特性は、さらに前方、合流部、速度超過、逆走車に対する注意喚起・警告という4つの詳細なサービス特性に分解できる。第2列は、各詳細サービスに対する重みを表し、第3列の便益Aは、各詳細サービスに対するドライバーの1トリップ当たりの便益(円/回)を表す。各詳細サービスは、第4列に示すサブシステムで実現されるが、第5列は各サブシステムが詳細サービスの実現に及ぼす貢献度を、第6列の便益Bは、各サブシステムが有する各詳細サービスに対するドライバーの1トリップ当たりの便益を表す。第7列は総交通量を表す。第8列から11列は、総交通量の中で当該のサブシステムのサービスを享受するドライバーの割合を補正する係数であり、「SAPAに立寄るか」、「ETCを利用しているか」、「ITSを利用しているか」、およびその他の要因による補正率を表している。1つのサブシステムが複数のサービス特性の実現に貢献する場合もあるが、各サブシステムの総便益は、それらの複数のサービス特性に対する加算和で表現される。

ことを意味しているわけではない。特に、構成概念変数 x_1^2 は構成概念変数 x_3^3 に影響を及ぼすことにより、結果的にドライバーのWTPに間接的に影響を及ぼすことになる。また、構成概念変数 x_1^1 と x_2^3 は、ともに「利便性向上」(図-6参照)と相関関係を有している。図-8は、WTPの推定結果を用いて、各提示額に対して「賛成」と答えるドライバーの割合を表現したものである。WTPの平均値は、図-8の生存関数の下側の面積に相当し、WTP関数の推計結果を用いて、

$$E[WTP] = \int_0^{\bar{T}} \exp(-E[\nu]T^\alpha) dT \quad (48)$$

と定義できる。ただし、 $E[\nu]$ は全ドライバーの構成概念変数 x_3^3 の平均値を用いて、式(47)より算定した位置パラメータ値である。WTPの平均値を算出する際の積分範囲の上限値 \bar{T} は、最大提示額(500円)で裾切りす

る。さらに、WTPの中央値は、次式の確率 p を0.5とすることで得られる。

$$WTP_{p=0.5} = \left\{ -\frac{1}{E[\nu]} \log(0.5) \right\}^{1/\alpha} \quad (49)$$

以上により、すべてのFDシステム、OPシステムを同時に導入したような完全情報システムに対するWTP中央値は、ドライバー1人あたり52.0円/台・トリップであることが判明した。しかし、最適システム更新戦略を求めるためには、完全情報システムに対するWTPを個々のサブシステム(および、その組み合わせ)のWTPに分解することが必要となる。MIMICモデルを用いた共分散構造モデルでは、潜在変数の期待値を0、分散を1に基準化しており、WTP関数の平均値および中央値を算出するために用いるワイブル関数の位置パラメータの平均値 $E[\nu]$ は、全ドライバーの構成概念変数 x_3^3 の

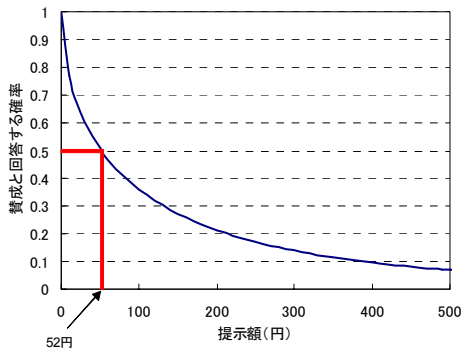


図-8 支払い意思額の推定結果

平均値を0として求めることができる。つまり、完全情報システムのWTP中央値は、全ドライバーの交通情報サービスに対する回答の平均値を構成概念変数の推計値としたものである。ここで、完全情報システムのWTP中央値を個々のサブシステムのWTPへ分解するために、交通機能サービス特性 l ($l = 1, \dots, n_y$) に対して、「必要でない」と回答した場合の観測変数を用いてWTP中央値を再推計し、完全情報システムのWTP中央値との差分を、交通機能サービス特性 l のWTPと定義する。ただし、交通機能サービス特性 l の便益を算出する際に機能 l 以外の観測変数は全ドライバーの平均値を用いる。つまり、交通機能サービス特性 l に対する支払い意思額 W_l は、交通機能サービス特性 l が「必要でない」と回答した場合の観測変数から算出した位置パラメータ ν_l を用いて、

$$W_l = \log(0.5)^{1/\alpha} \left\{ \left(-\frac{1}{E[\nu]} \right)^{1/\alpha} - \left(-\frac{1}{\nu_l} \right)^{1/\alpha} \right\} \quad (50)$$

と表せる。MIMICモデルは線形システムで構成されており、交通管制情報システム全体に対するWTPを、上式を用いて各交通機能サービス特性に対するWTPとして配分することが可能である。言い換えれば、交通管制情報システムの便益が、各交通機能サービス特性の便益の加算和として表現できることを前提としている。交通サービス機能の便益に重複部分がある（オーバーラップ効果）がある場合や、交通機能サービス特性に相乗効果（シナジー効果）が存在する場合には、交通機能サービス特性の相互作用を考慮した複雑なMIMICモデルを開発することが必要となる。この問題に関しては今後の課題としたい。

つぎに、交通機能サービス特性の支払い意思額 W_l ($l = 1, \dots, n_y$) からサブシステムの便益を算出する。交通機能サービス特性は、サブシステムの具体的な整備メニューの実現によってドライバーへ提供され

る。個々の整備メニュー（FD、OPシステム）の実現によって交通機能サービス特性の提供に与える貢献度を寄与率で表現し、さらに各システムの年間の利用者数を、交通量およびSA、PAへの立ち寄り率、ETCおよびITSの普及率により算出した補正係数によって、各サブシステムの総便益を算出する。サブシステム i の供用により発生する年間総便益 u_i は、

$$u_i = \sum_{l=1}^{n_y} \sum_{m=1}^{M_l} W_l \cdot \epsilon_m \cdot \phi_{ilm} \cdot T \cdot \psi_i \quad (51)$$

と表される。ここで、 ϵ_m ($m = 1, \dots, M_l$) は、交通機能サービス特性 l の各詳細サービス m に対する重み、 ϕ_{il} は、サブシステム i の実現が交通機能サービス特性 l の各詳細サービス m の実現に対する貢献度、 T は年間交通量、 ψ_i はサブシステム i に対して定義される補正係数である。なお、 T 、 ψ_i は、中日本高速道路株式会社横浜支社の実績値を用いる。重み ϵ_m および貢献度 ϕ_{il} に関しては、利用可能な情報は存在しないが、同社における交通専門技術者へのアンケート調査を行い、各詳細サービス間の相対評価をAHPを用いて算出した結果を用いている。貢献度 ϕ_{il} に関しては、利用可能な情報は存在しないが、同社において検討されたシステム開発コンセプトに基づいて設定した。以上の手順により、各サブシステムの便益を算定したが、検討のために用いた情報は膨大な量に及ぶ。ここでは、交通機能サービス特性の1つである「注意喚起」に対するドライバーのWTPを、各サブシステムに配分する過程を示している。表-2に示すように、「注意喚起」に対するドライバー1トリップ当たりの経済便益は7.4円である。OP-7（八王子支社の基幹システムの統合）は、圏央道の供用時期の関係で不確実性を有しているため、OPシステムとして取り扱う。OPシステムの導入費用は基幹システムに拡張オプションを確保するために必要な費用を表し、追加費用はOPシステムの交通機能サービス特性に対するWTPに基づいて、同様の方法で各サブシステムの便益を集計化できる。ここでは、紙面の都合上、その詳細については割愛する。

なお、本研究で実施している検定手法においては式(46)中の η_i^1, η_i^2 に推計誤差が含まれる。理論的厳密性を期すためには、構成概念変数の推計とWTPの推計を同時に行うか、もしくはtwo-step M-estimator²⁴⁾を用いて仮説検定を行う必要がある。本研究で推計した構成概念変数 x_1^2, x_2^2, x_3^2 の分散は0.353, 0.0690, 0.1123であり、本研究で採用した簡便な方法でも、深刻な異質分散バイアスは発生しないと判断した。しかし、共分散はそれぞれ0.120, 0.170, 0.058であり、その値は大きくはないものの、構成概念変数の誤差相関による推計バイアスの問題が存在しないとは言えない。また、WTPモデルの誤差項と構成概念変数の誤差項の相関が存在

表-7 入力情報一覧

システム	費用 (百万円)				瞬間価格 実現		便益 (百万円)
	総費用	導入費用	追加費用	維持費用	低減率	ハザード率	
基幹システム	1,070	1,070	—	10,700	—	—	—
FD-1	50	50	—	0.5	—	—	234.1
FD-2	50	50	—	0.5	—	—	8.9
FD-3	50	50	—	0.5	—	—	1.3
FD-4	80	80	—	0.8	—	—	70.7
FD-5	20	20	—	0.20	—	—	282.5
FD-6	500	500	—	5.0	—	—	739.6
FD-7	200	200	—	2.0	—	—	1,109.0
FD-8	500	500	—	5.0	—	—	538.9
FD-9	500	500	—	5.0	—	—	538.9
FD-10	300	300	—	3.0	—	—	48.0
FD-11	500	500	—	5.0	—	—	107.1
OP-1	300	120	180	3.0	1.00	0.25	11.3
OP-2	300	120	180	3.0	1.00	0.25	36.5
OP-3	300	120	180	3.0	1.00	0.25	29.2
OP-4	300	120	180	3.0	1.25	0.25	48.0
OP-5	50	20	30	0.5	1.50	0.25	9.6
OP-6	300	120	180	3.0	1.33	0.33	7.9
OP-7	20	8	12	0.2	1.25	0.33	1,840.0

注) OP-7 (八王子支社の基幹システムの統合) は、圏央道の供用時期の関係で不確実性を有しているため、OPシステムとして取り扱う。OPシステムの導入費用は基幹システムに拡張オプションを確保するために必要な費用を表し、追加費用はOPシステムを追加的に導入するために必要となる費用を表す。維持費用はシステムの故障を修理するために要する費用であり、その算定に当たっては筆者等が開発した故障解析モデル¹⁷⁾を用いている。

する可能性もあろう。さらに、事例によっては、異質性分散、誤差相関が存在する場合もあり、本研究で採用した簡便な方法を用いたときに推計バイアスが発生する可能性がある。このような説明変数の誤差分布の問題を回避するためには、MIMICモデルとWTPモデルの同時推計の方法論を開発することが必要となる。

(4) 分析結果

表-7に、各サブシステムの導入費用、追加費用、維持費用を示している。基幹システムの導入費用は、現時点において基幹システムを更新するために必要となる費用を表す。また、各FDシステムの導入費用は、現時点で当該システムを基幹システムに追加導入するために必要となる費用を表す。一方、OPシステムの導入費用は、現時点、もしくは将来時点において、当該システムを基幹システムに導入するための容量を確保するために必要となる費用、追加費用は現実に当該OPシステムを追加導入するために必要となる費用を表す。以上の費用データは、当該システムを生産する複数のメーカーによる見積もり額の平均値を採用したものである。また、維持費用はシステムの故障を修理するために要する費用の現在価値であり、その算定に当たっては筆者等が開発した動的故障解析モデル¹⁷⁾を用いている。実現確率は、それぞれ当該年度までに各OPシステムが実現する確率を表す。サブシステムの便益は、5.(3)に示した手順により、各サブシステムがもたらす便益の

表-8 最適更新戦略とオプション価値

	導入の有無	オプション価値	臨界スケール値
OP-1	×	-4,100万円	2.2839
OP-2	○	3,300万円	0.7071
OP-3	○	1,000万円	0.8838
OP-4	○	7,500万円	0.5118
OP-5	○	900万円	0.4134
OP-6	×	-4,800万円	3.0396
OP-7	○	740,800万円	0.0001

注) 導入の有無の欄で○印がついているOPシステムは拡張オプションを確保することを、×印の場合は拡張オプションを確保しないことを意味する。

現在価値の総和を求めた結果を示している。

以上の入力情報を用いて、最適システム更新モデルにより求めた最適システム更新戦略を求めた。以下、本ケースをベンチマークケースと呼ぶ。ベンチマークケースでは、初期時点が基幹システムの最適更新タイミングとなった。さらに、OPシステムに関する最適更新戦略は表-8のように整理できる。すなわち、OPシステムの拡張オプションとしてOP-2(ETC車載器を活用した警告)、OP-3(ETCを活用した休憩施設の情報収集、提供)、OP-4(予測情報の提供)、OP-5(移動式カメラの開発)、OP-7(八王子支社の集約)を採用することが望ましいことが判明した。しかし、OP-1(ITS車載器を活用した警告)、OP-6(ETC車載器、ITS車載器情報を活用した予測旅行時間計測)は拡張オプションとして確保し

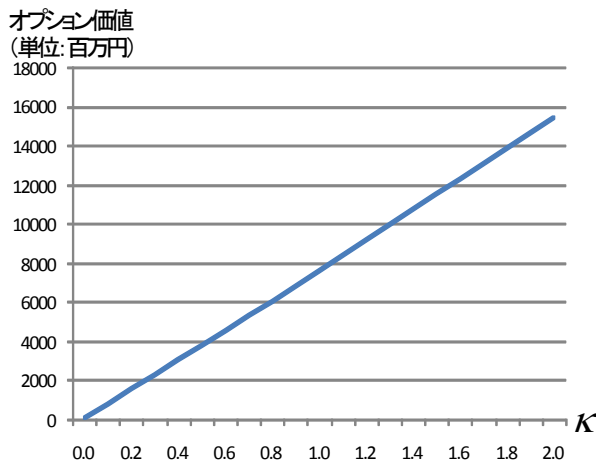


図-9 システム便益とオプション価値

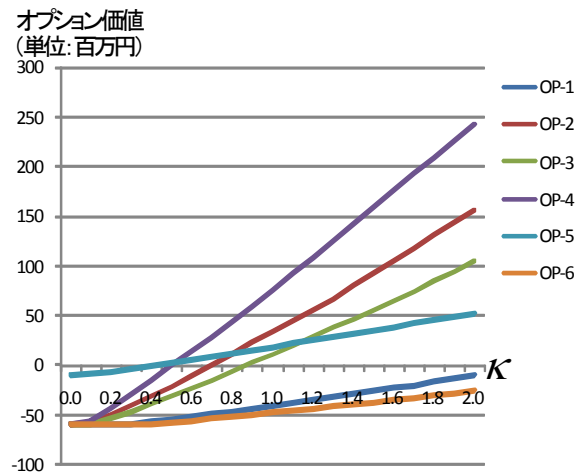


図-10 サブシステム便益とオプション価値

ない結果となっている。当然のことながら、限定された条件の下で実施したCVM調査による経済便益評価の結果のみに基づいて、OP-1、OP-6システム導入の妥当性を否定することは危険であることは言うまでもない。これらのOPシステムの経済便益に関する分析を継続することが必要であることは論を待たない。

表-8には、各OPシステムの拡張オプション価値を求めた結果も併記している。同表に示すように、OP-1とOP-6は、オプション価値が負となっており、これら2つのサブシステムの拡張オプションを確保する必要がないという結果になっている。また、基幹システムの更新を遅らせることにより獲得できる情報オプション価値 $OP_{infor}(\gamma(\tau_0))$ は0である。すなわち、ベンチマークケースでは、システムの最適更新時刻はすでに過ぎ去っており、できるだけ速やかに基幹システムを更新することが望まれる。その結果、システムの更新を延期することによって得られる追加便益は存在しない結果となっている。

以上で求めた最適システム更新戦略は、各サブシステムの便益の推計結果に依存している。特に、OPシステムは未実現のシステム技術であり、ドライバーが正確に便益を評価していない可能性も否定できない。そこで、OPシステムの便益 f_i を系統的に変化させ、最適システム更新戦略に変化が発生するかについて感度分析を試みた。OPシステムの便益を

$$\hat{f}_i = \kappa_i f_i \quad (52)$$

と表現する。ただし、 κ_i は、ベンチマークケースにおける便益 f_i に対して、どの程度便益が変化するかを表す比例的スケールパラメータである。図-9は、すべてのOPシステムのスケールパラメータ κ_i が一律に変化することにより、システム全体のオプション価値がどのよ

うに変化するかを分析した結果を示している。同図に示すようにスケールパラメータ κ_i を変化させることにより、システム全体のオプション価値は線形に変化している。ただし、いずれのケースでも、初期時点が最適システム更新時点として選ばれていることを断っておく。言い換えれば、FDシステムのみを導入する場合でも、初期時点が最適システム更新時点であることが理解できる。

さらに、図-10は各OPシステムのスケールパラメータ κ_i の変化と各OPシステムの拡張オプション価値の変化を分析した結果を示している。スケールパラメータ κ_i の値が小さくなれば、拡張オプション価値は減少する。すなわち、各OPシステムの導入費用の低減割合が小さくなる。各OPシステムの導入費用が一定である限り、OPシステムの便益が大きくなれば、拡張オプション価値は大きくなる。ベンチマークケースと比較して κ_3 の値が0.9程度まで下がると、OP-3の拡張オプション価値が負となり、OP-3の拡張オプションを確保するメリットは喪失する。さらに、 κ_2 が0.7程度まで下がるとOP-2の拡張オプション価値が負となる。さらに、OP-4、OP-5も、それぞれのスケールパラメータが0.5、0.4程度まで低下すると、拡張オプション価値は負となり、システムの導入が正当化できなくなる。なお、図-10では、OP-7の拡張オプション価値の記載を割愛している。これは、OP-7の拡張オプション価値が他のサブシステムのオプション価値より100倍程度大きい値を示しており、同一の図に掲載することが不可能なためである。つぎに、各サブシステムのオプション価値が0となるような臨界的なスケールパラメータ値（以下、臨界スケール値と呼ぶ） κ_i^* を定義する。各OPシステムの臨界スケール値を求めた結果を表-8に併記している。ベンチマー

クケースでは基幹システムへの導入が見送られた OP-1, OP-6 の臨界スケール値は、それぞれ 2.2839, 3.0396 となっている。言い換えれば、OP-1, OP-6 の便益計測を精緻化し、その評価結果がベンチマークケースに対して 3 倍程度大きくなれば、基幹システムに導入することが十分に正当化される可能性があることを示唆している。逆に、残りの OP システムは、ベンチマークケースよりも便益が低下しても基幹システムに導入することが経済的に正当化される。特に OP-7 の臨界スケール値は極めて小さい値 0.0001 をとっており、八王子支社の統合というオプションの経済価値は非常に大きいことが理解できる。

6. おわりに

本研究では、技術的陳腐化を考慮した大規模情報システムの最適更新問題をとりあげた。その際、大規模情報システムが、基幹システムと複数のサブシステムで構成されると考える。その際、技術的陳腐化が、1) 情報システムの導入費用の低減、2) 新しいサブシステムの出現により、情報システムの技術的陳腐化が発生すると考えた。基幹システムの不可分性とサブシステム技術の実用化タイミングの不確実性に起因して、大規模情報システムの更新時期決定問題に、情報オプションと拡張オプションが存在することを明らかにした。このようなオプション価値を明示的に考慮し、期待純便益を最大にするような更新時点とサブシステムのメニューを決定するような最適更新モデルを定式化した。さらに、高速道路の大規模情報システムを対象とした実証分析を通じて、本研究で提案した方法論の有効性を実証的に検証しえたと考えるが、今後の研究課題として以下の事項が残されている。第 1 に、本研究では、新技術の実用化時点に関わらず、導入費用が一定であると仮定している。実用化時点により、それ以降の導入費用が経年的変化に依存する場合、本研究で提案した最適更新モデルを拡張することにより対処できる。その場合、確率動的計画問題が飛躍的に複雑になるため、効率的な解法を開発することが必要となる。第 2 に、MIMIC モデルの構成概念変数の誤差相関による推計バイアスの問題を解決する必要がある。WTP モデルの誤差項と構成概念変数の誤差項の相関が存在する場合や異質性分散、誤差相関が存在する場合には、MIMIC モデルと WTP モデルの同時推計の方法論を開発することが必要となる。第 3 に、交通管制情報システム便益の計測方法の精緻化を図ることが必要である。利用者が新しい交通管制情報システムの経済便益を正確に認知することには困難である。このため、交通管制情報システムの導入効果を分析するためには、交通シミュレーションモ

デル等を用いた交通流解析による経済便益の測定方法を開発することが必要である。また、複数のサブシステムが同時に実現することによる便益のオーバーラップ効果、あるいはシナジー効果を計測する方法を開発することが必要である。最後に、本研究では、情報システムの陳腐化を、最適システムと現有システムとの純便益の乖離により定義した。しかし、情報システムの陳腐化に対しては、より広範囲の視点から検討することが必要となる。たとえば、ドライバーの心理効果や宣伝効果等、技術開発誘導効果のように、経済的純便益以外にも、多くの側面から検討することが必要となると考える。

なお、本研究の一部は文部科学省「若手研究者の自立的な研究環境整備促進」事業によって大阪大学グローバル若手研究者フロンティア研究拠点にて実施された。

参考文献

- 1) 徳井丞次, 乾友彦, 落合勝昭: 資本のヴィンテージ, 研究開発と生産性, 宮川努編: 失われた 10 年を超えて研究会報告書, pp.27-52, 日本経済研究センター, 2006.
- 2) Solow, R.: Investment and technical progress, in Arrow, K., Karlin, S., and Suppes, P.(eds.): *Mathematical Methods in the Social Sciences*, pp.89-104, Stanford University Press, 1960.
- 3) Jorgenson, D.W. and Griliches, Z.: The explanation of productivity change, *Review of Economic Studies*, Vol.34, pp.249-283, 1967.
- 4) 野村浩二: 資本の測定, 慶應義塾大学出版会, 2004.
- 5) 国則守生: 設備の償却率について, わが国建設機械の計測例, 経済経営研究, Vol.9-3, 日本開発銀行設備投資研究所, 1988.
- 6) Gordon, R.J.: *The Measurement of Durable Good Prices*, University of Chicago Press, 1990.
- 7) Hulten, C.: Growth accounting when technical change is embodied in capital, *American Economic Review*, Vol.82, pp.964-980, 1992.
- 8) Bahk, B. and Gort, M.: Decomposing learning by doing in new plant, *Journal of Political Economy*, Vol.101, No.4, pp.561-583, 1993.
- 9) Sakellaris, P. and Wilson, D.: Quantifying embodied technical change, *Review of Economic Dynamics*, Vol.52, No.2, pp.255-276, 2004.
- 10) Romer, P.M.: Increasing returns and long-run growth, *Journal of Political Economy*, Vol.94, pp.1002-1037, 1986.
- 11) Barro, R.J. and Sala-i-Martin, X.: *Economic Growth*, McGraw-Hill, 1995, 大住圭介訳: 内生的経済成長理論, 九州大学出版会, 1997.
- 12) Jones, C.I.: *Introduction to Economic Growth*, W.W. Norton & Company, Inc, 1998, 香西泰訳: 経済成長理論入門, 日本経済新聞社, 1999.
- 13) Pindyck, R.S.: Irreversibility, uncertainty, and investment, *Journal of Economic Literature*, Vol.29, pp.1110-1148, 1991.
- 14) Dixit, A.K. and Pindyck, R.S.: *Investment Under Uncertainty*, Princeton University Press, 1994.
- 15) Trigeorgis, L.(ed.): *Real Options in Capital Investment: Models, Strategies, and Applications*, Praeger, 1995.

- 16) Copeland, T. and Antikarov, V.: *Real Options*, Texere, 2001.
- 17) 山本浩司, 青木一也, 貝戸清之, 小林潔司: 劣化現象を考慮した大規模交通管制システムの動的故障解析, 土木学会論文集F, Vol.64, No.3, pp.295-310, 2008.
- 18) Lancaster, T.: *The Econometric Analysis of Transition Data*, Cambridge University Press, 1990.
- 19) Gourieroux, C.: *Econometrics of Qualitative Dependent Variables*, Cambridge University Press, 2000.
- 20) 貝戸清之, 山本浩司, 小濱健吾, 岡田貢一, 小林潔司: ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデル: 大規模情報システムへの適用, 土木学会論文集F, Vol.64, No.2, pp.115-129, 2008.
- 21) 例えば, 栗山浩一: 環境の価値と評価手法, 北海道大学図書刊行会, 1998.
- 22) 松島格也, 湧川勝己, 大西正光, 伊藤弘之, 小林潔司: 水害による被災家計の精神的被害の経済評価, 土木計画学研究・論文集, Vol.24, pp.263-272, 2007.
- 23) 例えば, 豊田秀樹: 共分散構造分析 [入門編], 朝倉書店, 1998.
- 24) Wooldridge, J.: *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data*, The MIT Press, 2002.

(2008. 9. 3 受付)

THE OPTIMAL REPLACEMENT POLICY FOR LARGE INFORMATION SYSTEMS WITH REFERENCE TO OBSOLESCENCE

Koji YAMAMOTO, Kiyoyuki KAITO, Kazuya AOKI, Kiyoshi KOBAYASHI
and Kensuke HISHIDA

The system obsolescence driven by the change in drivers' needs and technological innovation should be considered in order to investigate the replacement strategies of the large information systems. The obsolescence processes are characterized by a lot of uncertainties. In such circumstances, there exist 1) information options made by postponing the replacement timing, and 2) extension options driven by securing the possibilities to be introduced in future. In this paper, the optimal system replacement model is formulated in order to investigate the optimal replacement timing and the best milieu of subsystems to maximize the expected net benefits. The methodology is presented to measure the values of real options for the systems replacement. The methodology is applied to the optimal replacement problem of the large traffic control systems in the real world.